

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

LETECKÝ ÚSTAV

INSTITUTE OF AEROSPACE ENGINEERING

NÁVRH POHONNÉ JEDNOTKY SOUTĚŽNÍHO MODELU LETOUNU

PROPULSION UNIT OF COMPETITION MODEL AIRPLANE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

Miroslav Vančo

AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE

Ing. Tomáš Hájek

SUPERVISOR

BRNO 2021

Zadání bakalářské práce

Ústav: Letecký ústav
Student: **Miroslav Vančo**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: **Ing. Tomáš Hájek**
Akademický rok: 2020/21

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Návrh pohonné jednotky soutěžního modelu letounu

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Navrhněte pohonnou jednotku letadla studentského týmu Chicken Wings pro soutěžní ročník 2022.

Cíle bakalářské práce:

1. Vyberte pohonnou soustavu (motor, vrtule, regulátor) s ohledem na pravidla soutěže pro soutěžní sezonu 2022.
2. Ověřte správnost parametrů vybrané pohonné soustavy.

Seznam doporučené literatury:

RAYMER, D.: Aircraft design: a conceptual approach. 3. print. Washington: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1989. ISBN 09-304-0351-7.

GUDMUNDSSON, S.: General aviation aircraft design: applied methods and procedures. Oxford: Elsevier, 2014. ISBN 978-0-12-397308-5.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2020/21

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Jaroslav Juračka, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Táto bakalárska práca sa zaoberá návrhom a overením funkčnosti pohonu súťažného modelu lietadla podľa pravidiel na súťaž Aero Design East. V úvode práce sú vysvetlené pravidlá a následne je spravená bodová analýza. Rešeršná časť je venovaná jednotlivým komponentom pohonného systému. Na základe výpočtov z údajov výrobcu a závislostí parametrov na rýchlosti letu a otáčkach, sú následne vybrané najvhodnejšie konfigurácie. Tieto konfigurácie sú následne overené pomocou meraní statického ťahu a meraní v aerodynamickom tuneli. Pri týchto meraniach sú tiež skúmané reakcie limiteru na hraničnej hodnote príkonu. Následne, v poslednej časti, je realizovaný výber pohonnej sústavy.

KLÚČOVÉ SLOVÁ

Pohonná sústava, elektrický motor, vrtuľa, statický ťah, príkon, limiter, meranie, aerodynamický tunel

ABSTRACT

This bachelor's thesis deals with the design and validation of the operation of the model propulsion system, according to the Aero Design East rules. The introduction is focused on rules and regulations of the competition and then, the point analysis is carried out. The research section is devoted to an overview of the propulsion system components and their basic parameters. The most appropriate configurations of the propulsion system are selected, based on calculations from the manufacturer's datasheet. These configurations are then validated by measurements of static thrust and measurements in aerodynamic tunnel. In these measurements, the responses of the limiter for boundary power are also examined. In the last part, the choice of the propulsion system is completed.

KEY WORDS

Propulsion system, electric motor, propeller, static thrust, power, limiter, measurement, aerodynamic tunnel

BIBLIOGRAFICKÁ CITÁCIA

VANČO, Miroslav. *Návrh pohonné jednotky soutěžního modelu letounu*. Brno, 2021. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/132135>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Letecký ústav. Vedoucí práce Tomáš Hájek.

ČESTNÉ PREHLÁSENIE

Ja, Miroslav Vančo, prehlasujem, že som bakalársku prácu na tému **Návrh pohonnej jednotky súťažného modelu letounu** vypracoval samostatne s použitím odbornej literatúry a prameňov, uvedených v zozname, ktorý tvorí prílohu tejto práce.

20. 5. 2021

Dátum

Miroslav Vančo

POĎAKOVANIE

Predovšetkým by som chcel poďakovať svojmu vedúcemu bakalárskej práce Ing. Tomášovi Hájkovi za jeho cenné rady, konzultácie, trpezlivosť a ochotu pri tvorbe tejto bakalárskej práce. Ďalej by som chcel poďakovať doc. Ing. Daliborovi Rozehnalovi, Ph.D. a RNDr. Zděnkovi Hubáčkovi za konzultácie pri výbere vrtule, Bc. Jiřímu Walterovi za pomoc pri meraní v aerodynamickom tuneli, Samuelovi Liptákovi za pomoc a cenné rady pri tvorbe elektrického obvodu a členom brnenskej aj pražskej časti tímu Chicken Wings. V neposlednom rade by som chcel poďakovať svojej rodine, ktorá ma podporovala po celú dobu štúdia.

OBSAH

1.	ÚVOD	13
2.	SÚŤAŽ AERO DESIGN EAST	14
2.1.	Pravidlá a obmedzenia	14
2.2.	Rozbor bodového hodnotenia pre letovú časť	16
2.3.	Schéma obvodu	20
3.	MODELÁRSKE BATÉRIE	20
3.1.	Alkalické primárne	21
3.2.	Nikel kadmiové	21
3.3.	Nikel metalhydridové	22
3.4.	Lítium-polymérové	22
3.5.	Lítium - iónové	24
3.6.	Lítium - železo - fosfátové	24
3.7.	Olovené	25
3.8.	Analýza batérií	26
4.	MOTORY	28
4.1.	Piestový spaľovací motor	28
4.1.1.	Žhaviace	29
4.1.2.	Benzínové	29
4.2.	Elektrické motory	29
4.3.	Analýza motorov	31
5.	REGULÁTOR	32
5.1.	Analýza regulátorov	33
6.	LIMITER	35
7.	VRTUĽA	35
7.1.	Geometrické vlastnosti	36
7.2.	Aerodynamické vlastnosti	40
7.3.	Electric duct fan	43
7.4.	Analýza vrtulí	45
8.	VÝPOČET PARAMETROV POHONU V ZÁVISLOSTI NA RÝCHLOSTI A OTÁČKACH	47
9.	MERANIE PARAMETROV POHONU	47
9.1.	Meranie statického ťahu	52

9.1.1.	Vrtuľa APC 20x8E	53
9.1.2.	Vrtuľa APC 20x11E	56
9.1.3.	Vrtuľa APC 22x10E	59
9.2.	Meranie v aerodynamickom tuneli	64
10.	ZHRNUTIE KONCEPCIE POHONU	68
11.	ZÁVER.....	70
	ZOZNAM POUŽITÝCH ZDROJOV	71
	ZOZNAM SKRATIEK A ZNAKOV	75
	ZOZNAM OBRÁZKOV	76
	ZOZNAM TABULIEK.....	78
	ZOZNAM ELEKTRONICKÝCH PRÍLOH.....	79

1. ÚVOD

Táto bakalárska práca sa zaoberá návrhom pohonnej sústavy súťažného modelu lietadla študentského tímu Chicken Wings na medzinárodnú konštruktérsku súťaž SAE Aero Design East 2022. Na počiatku práce sú uvedené základné informácie o súťaži a základné pravidlá súťaže spojené s ich bodovou analýzou.

Cieľom rešeršnej časti je oboznámiť s rôznymi modelárskymi batériami, motormi, regulátorom a fungovaním vrtule. Po každej časti je uvedená analýza s výberom daných súčiastok s ohľadom na pravidlá súťaže. Pre ďalšiu prácu sú uvedené spolu s ich technickými parametrami. Súčasťou rešerše sú aj výpočty a z nich vyjadrené závislosti prevedené pre zúženie možného výberu rôznych súčiastok.

S ohľadom na pravidlá súťaže, je kladený dôraz na maximálny statický ťah pri obmedzenom príkone na 1000 W, ťah do vzletovej rýchlosti a časovú výdrž. Pri meraniach v praktickej časti, je overené správanie limiteru pri hodnotách hraničného príkonu.

Praktická časť pozostáva z troch častí. Prvou je analýza závislostí parametrov na rýchlosti z dostupných údajov výrobcu vrtulí a ich prepočet do metrickej sústavy. Druhá časť pozostáva z merania statického ťahu vrtulí vybraných na základe predošlej analýzy. Tretia časť je zložená z overenia parametrov závislých na rýchlosti meraním v aerodynamickom tuneli pri rýchlostiach mierne nad vzletovú rýchlosť. Údaje z meraní sú následne pomocou štatistických výpočtov prevedené do tabuliek a grafov závislostí jednotlivých parametrov.

V záverečnej časti bakalárskej práce je na základe meraní následne navrhnuté konečné najvýhodnejšie zloženie pohonu pre ročník 2022, s uvedenými najdôležitejšími parametrami pohonu.

2. SÚŤAŽ AERO DESIGN EAST

Súťaž SAE Aero Design East je každoročne organizovaná v USA pod záštitou SAE (Society of Automotive Engineers) International, ktorá organizuje súťaže pre študentov a mladé talenty. Jednou z myšlienok pri založení, bolo napodobenie situácie reálneho inžinierskeho projektu so skutočnými problémami, obmedzeniami a v určenom čase pre účastníkov z radov študentov. K pôvodným súťažiam, najmä v oblasti automotive, bola v roku 1986 pridaná súťaž Aero Design, ktorá sa v roku 1995 rozdelila na dve divízie: East a West. Pre každý tím je nutné splniť všetky fázy návrhu lietadla (návrh, výpočet, výroba). Na nich je postavená technická správa, ktorá má pevný termín odovzdania v časovom predstihu pred súťažou. Táto správa tvorí jednu z troch hlavných hodnotiacich častí celej súťaže. Po odovzdaní technickej správy už nie je umožnené tímom meniť lietadlo a na súťaži je nutné používať len vybavenie lietadla opísané v technickej správe [29].

Súťaž má každoročne zverejnené pravidlá [18] s letovou misiou s určitými špecifikami pre každý ročník. Účastníci sú povinný tieto špecifiká splniť a dospieť k optimálnemu prieniku jednotlivých požiadaviek a obmedzení. SAE Aero Design je rozdelená do troch kategórií tzv. class: Advanced class, Regular class, Micro class. Tím Chicken Wings sa prvýkrát zúčastnil ročníka SAE 2020 v kategórii Regular class (kde obsadil celkové 12. miesto a v letovej časti dokonca 7. miesto), pričom je záujem o zúčastnenie sa ďalšieho ročníka SAE 2022 znovu v kategórii Regular class. V tejto kapitole a bakalárskej práci budú preto spomínané obmedzenia, pravidlá a letová misia pre kategóriu Regular class. Vzhľadom na nutnosť použitia imperiálnej sústavy zo strany organizátora súťaže, budú niektoré hodnoty uvádzané v imperiálnych aj metrických mierach.

2.1. Pravidlá a obmedzenia

Základy pravidiel sa menia každé tri roky. Každý rok sú v pravidlách menšie zmeny (napr. zmena množstva nákladu), ktoré zabráňujú použitiu lietadla z minulého ročníka. Vďaka tomu je nutné vytvoriť nový, pozmenený koncept lietadla čo najlepšie spĺňajúci požiadavky naň v daný ročník kladené a zároveň spĺňajúci pravidlá daného ročníka. Ročník 2020 bol prvý v rade troch ročníkov rovnakých základov pravidiel [18].

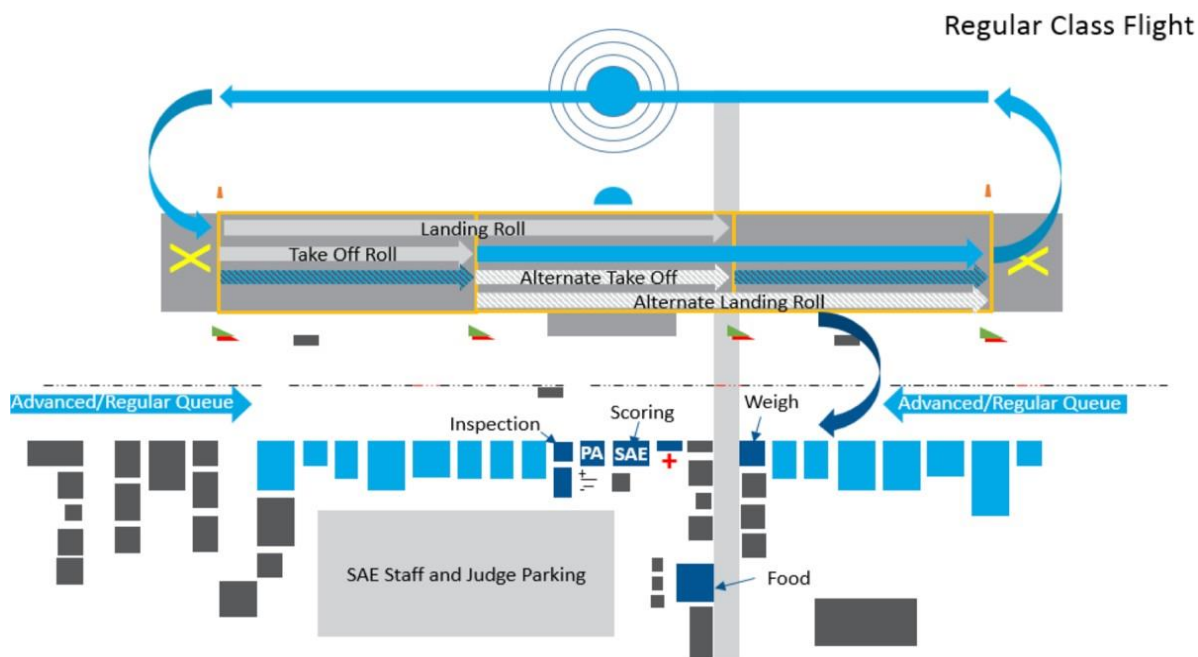
Základné požiadavky na súťažný model sú [18]:

- Povolené len lietadlá s pevným krídlom
- Maximálna vzletová hmotnosť (MTOW) do 55 libier, resp. 24,95 kg
- Schopnosť riadenia lietadla na zemi – riaditeľný podvozok
- Náklad musí byť bezpečne zaistený a upevnený v priestore preň určenom a zaistený voči pohybu počas letu, hmotnostný náklad musí byť navzájom prepojený resp. zaistenie musí prechádzať celým hmotnostným nákladom

- Lietadlo musí byť schopné letu bez nákladu – náklad nesmie byť súčasťou konštrukcie lietadla
- Lietadlo musí byť označené číslom tímu na oboch stranách krídla (aspoň 3 palce, resp. 76,2 mm veľké) a na trupe, kde musí byť uvedený názov tímu, adresa a celý názov univerzity
- Lietadlo musí mať označené ťažisko klasickým symbolom, pričom jeho poloha bude overená pri technickej inšpekcii
- Safety plug – fyzické, bezpečnostné odpojenie pohonného obvodu, umiestnené na hornej strane trupu/krídla v 40 – 60 % dĺžky lietadla, výraznej farby, umiestnené v obvode medzi regulátorom a batériou
- Lietadlo môže byť pri štarte na mieste pridržiavané členom tímu

Požiadavky kategórie Regular class sú [18]

- Maximálne rozpätie krídel 120 palcov resp. 3,048 m
- Pohon pomocou jedného elektromotoru (možnosť sprevodovania len v pomere 1:1) a jednej vrtule
- Zákaz použitia FRP (Fiber-reinforced plastic) pri stavbe, výnimku tvoria kupované diely podvozka, pohonu, atď.
- Nutnosť použitia sponzorom súťaže dodaného obmedzovača príkonu na 1000 W, ktorý nesmie byť upravený a musí byť umiestnený na viditeľnom mieste
- Batéria musí byť komerčne dostupný 6 článok typu Li-Pol o kapacite minimálne 3000 mAh a vybíjacom prúde minimálne 25C
- Pri použití separátnej batérie nutnosť použitia typu Li-Pol príp. LiFe o kapacite dostatočnej na pohon napájanej elektroniky po dobu letu, nie však menšej ako 1000 mAh
- Použitie telemetrie, gyroskopov, autopilota príp. iných pomocných zariadení je zakázané
- Náklad sa skladá z hmotnostnej a objemovej časti, kde objemovú časť tvorí aspoň jedno sférické teleso (futbalová lopta) o obvode 27 - 28 palcov resp. 685,8 - 711,2 mm, hmotnosti 14 - 16 uncí resp. 396,9 - 453,6 gramov, nafúknuté na tlak 9 - 15,6 psi resp. 62,053 - 107,558 kPa a kde hmotnostnú časť tvoria oceľové pláty



Obr. č. 2-1: Schéma letovej misie pre ročník 2020 [39]

2.2. Rozbor bodového hodnotenia pre letovú časť

Pri rozbere bodového hodnotenia v tejto kapitole bolo vychádzané z dostupných informácií a pravidiel z ročníka 2020 [18]. V ročníku 2020 bol prevedený spoločný tímový rozbor pravidiel, ktorý je spomenutý v záverečných prácach, ktoré boli postavené na model pre ročník 2020 (napr. [25]). Pri rozbere pre ročník 2022 bolo tiež vychádzané z niektorých údajov z ročníka 2020 v Tab. č. 1.

Tab. č. 1: Základné vypočítané parametre lietadla [25]

	Hodnota	Jednotky
Max.vzletová hmotnosť	18,5 ; 40,79	[kg] ; [lbs]
Prázdna hmotnosť	5,42 ; 11,95	[kg] ; [lbs]
Hmotnosť nákladu	13,08 ; 28,84	[kg] ; [lbs]
Hmotnosť lopty	0,45 ; 0,99	[kg] ; [lbs]
Vzletová rýchlosť	11 ; 24,61	[m/s] ; [mph]
Cestovná rýchlosť	18,5 ; 41,38	[m/s] ; [mph]
Plocha krídla	1,08 ; 11,63	[m ²] ; [ft ²]
Rozpätie krídla	2,64 ; 8,66	[m] ; [ft]
Dĺžka nákladu	0,226 ; 0,74	[m] ; [ft]

Celkový počet bodov je daný súčtom bodov z technickej správy, ústnej prezentácie a letovej časti. Pri porušení pravidiel príp. nedodržaní časových termínov je možnosť bodovej penalizácie. Pri letovej časti sú ohodnotené tri najlepšie lety. Počet

pokusov nie je obmedzený. Počas pokusov je možnosť meniť množstvo a hmotnosť nákladu pred dosiahnutím čo najlepšieho bodového výsledku. Cieľom je navrhnúť lietadlo s čo najväčšou únosnosťou nákladu pri čo najmenšom rozpätí a čo najmenšej dĺžke nákladového priestoru, schopné odštartovať na dráhe dĺžky 100 stôp resp. 30,48 metrov a splniť letovú misiu podľa Obr. č. 2-1. Počet bodov možno vypočítať zo vzorca (2.1) [18], resp. (2.2) [30]:

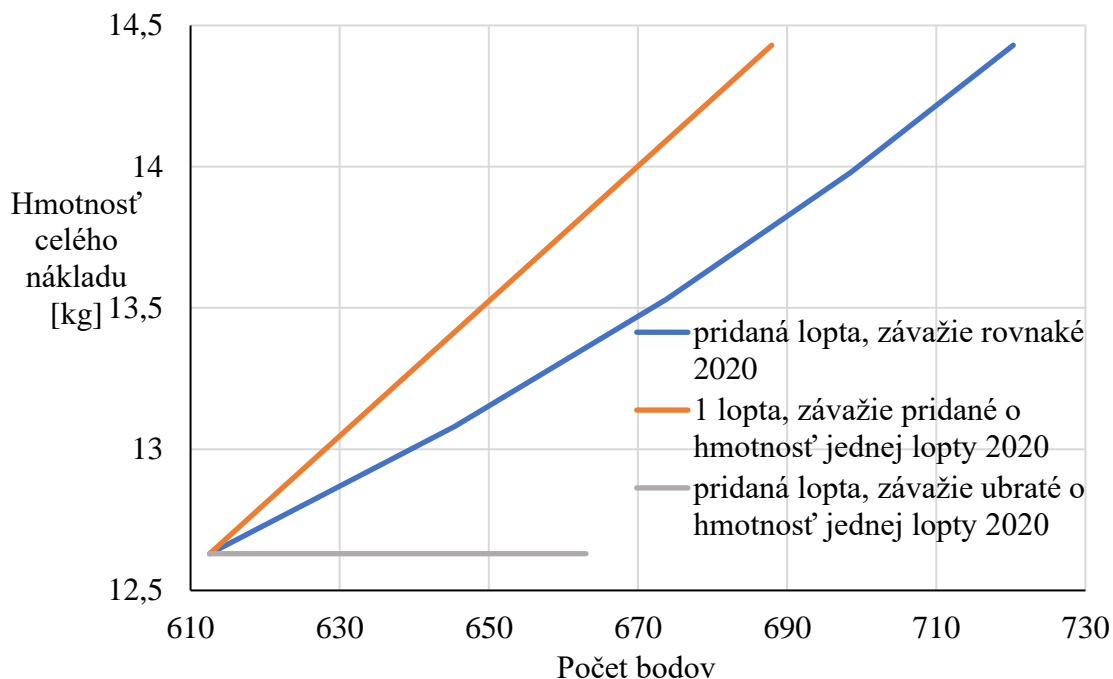
$$\text{Pre ročník 2020} \quad FS_i = 120 \cdot \frac{2 \cdot S + W}{b + L} \quad (2.1)$$

$$\text{z čoho vyplýva:} \quad FS_i = 120 \cdot \frac{2 \cdot 1 + 12,63}{2,64 + 0,226} = 612,56$$

$$\text{pre ročník 2021} \quad FS_i = 120 \cdot \frac{3 \cdot S + W}{b + L} \quad (2.2)$$

kde: FS_i – celková suma bodov z jedného letu [-]
 S – počet kusov sférického nákladu [-]
 W – množstvo hmotnostného nákladu [lbs]
 b – rozpätie krídel [ft]
 L – dĺžka nákladu [ft]

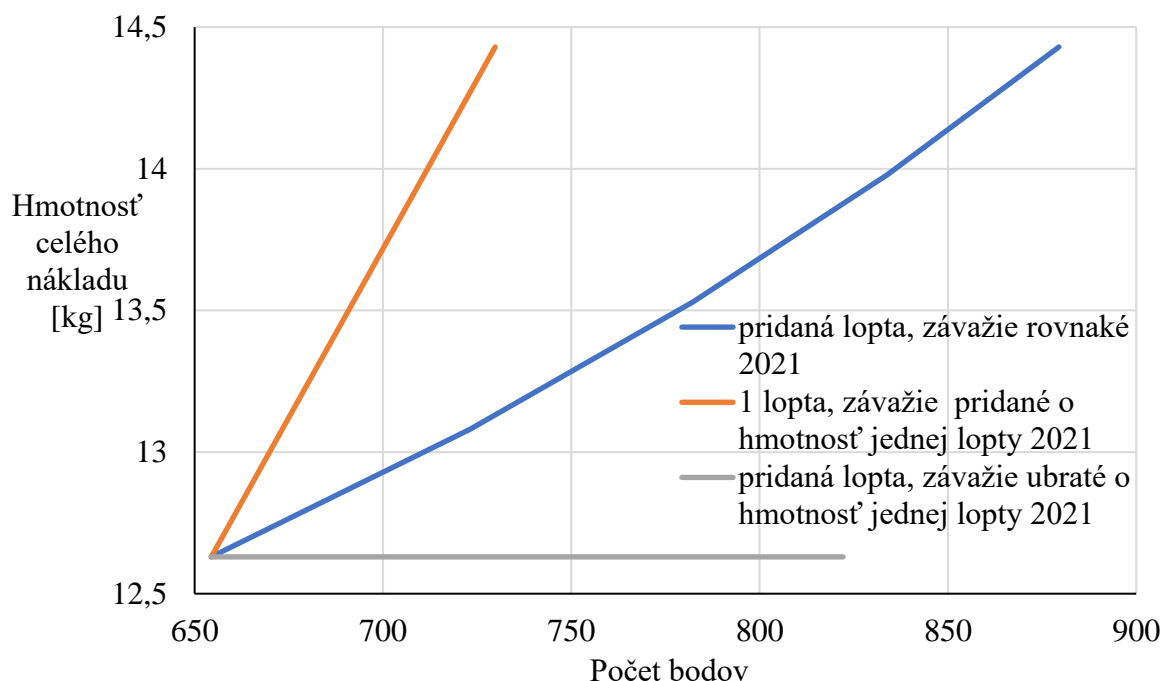
V prvotných fázach návrhu súťažného lietadla je nutné určiť konfiguráciu nákladu. Pri vychádzaní z výpočtu pre počet bodov pre ročník 2020 resp. 2021 boli v úvahu brané tri rôzne konfigurácie nákladu. Prvou bola konfigurácia o rovnakej hmotnosti hmotnostného nákladu a postupnom pridávaní objemového nákladu po jednom kuse (od 1 kusu po 5 kusov), pri súčasnom predlžovaní nákladu práve o tento jeden pridaný kus. Druhou bola konfigurácia o jednom kuse objemového nákladu a postupnom pridávaní hmotnostného nákladu zakaždým o hodnotu hmotnosti jedného kusa objemového nákladu (celkovo 5 hmotností) pri zachovaní základnej dĺžky nákladového priestoru. Treťou bola konfigurácia pri ktorej bol pri každej zmene pridaný jeden kus objemového nákladu a zároveň bola odobratá z hmotnostného nákladu zakaždým hmotnosť práve jedného kusa objemového nákladu.



Obr. č. 2-2: Porovnanie konfigurácií pre ročník 2020

Pri porovnaní konfigurácií z ročníka 2020 je možné sledovať, že na základe výpočtového vzorca zverejneného v pravidlách daného ročníka [18], je bodovo najviac výhodné odnieť väčší objemový náklad pri rovnakej hmotnosti závažia aj za cenu predĺženia nákladového priestoru. Toto riešenie ale so sebou nesie niekoľko nevýhod, pri pozdĺžnom usporiadaní objemového nákladu napríklad výrazné posunutie ťažiska vzad, pri usporiadaní niekoľkých lôpt vedľa seba, resp. pod/nad seba, napríklad výrazné zvýšenie aerodynamického odporu. Preto bola zvolená druhá varianta o menšom počte objemového nákladu a vyššej hmotnosti hmotnostného nákladu. Pri tejto variante je bodový zisk o niečo nižší, ako je možné vidieť na Obr. č. 2-2, má však niekoľko výhod, či už z pohľadu aerodynamického tvaru alebo aj nákladu, ktorý možno ľahko sústrediť v hodnotách ťažiska, ktoré zaručí dobré letové vlastnosti.

Pri porovnaní rovnakých konfigurácií, ale pri využití pozmeneného výpočtového vzorca skóre pre ročník 2021 z Obr. č. 2-3, je možné vidieť, že možnosť ponechania rovnakej hmotnosti závažia a súčasného pridávania objemového nákladu je ďaleko najvýhodnejšia [30]. Naopak najmenej výhodná je možnosť ponechania jedného kusa objemového nákladu a pridania hmotnostného nákladu. Pri takýchto výsledkoch je na mieste úvaha o zmene konceptu nákladového priestoru oproti ročníku 2020. Ideálnou zmenou by mohla byť zmena koncepcie na náklad tvorený niekoľkými kusmi objemového nákladu. Pri ponechaní koncepcie z roku 2020 by bolo nutné výrazne zvýšiť hmotnosť závažia a tým pádom aj výrazne zvýšiť vzletovú hmotnosť lietadla (pridanie jedného kusa objemového nákladu sa vyrovná 4 pridaniam hmotnostného nákladu, tj. zvýšeniu vzletovej hmotnosti o 1,35 kg). Po skúsenostiach s krátkou vzletovou dráhou, je táto možnosť málo pravdepodobná aj pri možnom reálnom dosiahnutí zvýšenia ťahu.



Obr. č. 2-3: Porovnanie konfigurácií pre ročník 2021

Bonusové body je možné získať za dobrý odhad preneseného nákladu tzv. PPB (Payload prediction bonus). Ten je možné určiť z definovaného vzorca (2.3) [18]:

$$PPB = 10 - (A - P)^2 \quad (2.3)$$

$$\text{kde:} \quad A = W + 0,9375 \cdot S \quad (2.4)$$

kde: PPB – bonus za odhad nákladu (payload prediction bonus) [-]

A – náklad skutočne prenesený [-]

P – náklad predpokladaný [-]

S – počet kusov sférického nákladu [-]

W – množstvo hmotnostného nákladu [lbs]

Výsledný počet bodov za letovú časť je súčtom bodov troch najlepších pokusov a PPB bonusu čo možno určiť zo vzorca (2.5) [18]:

$$FFS = FS_1 + FS_2 + FS_3 + PPB \quad (2.5)$$

kde: PPB – bonus za odhad nákladu (payload prediction bonus) [-]

$FS_{1;2;3}$ – sumy bodov z jednotlivých troch najlepších letov [-]

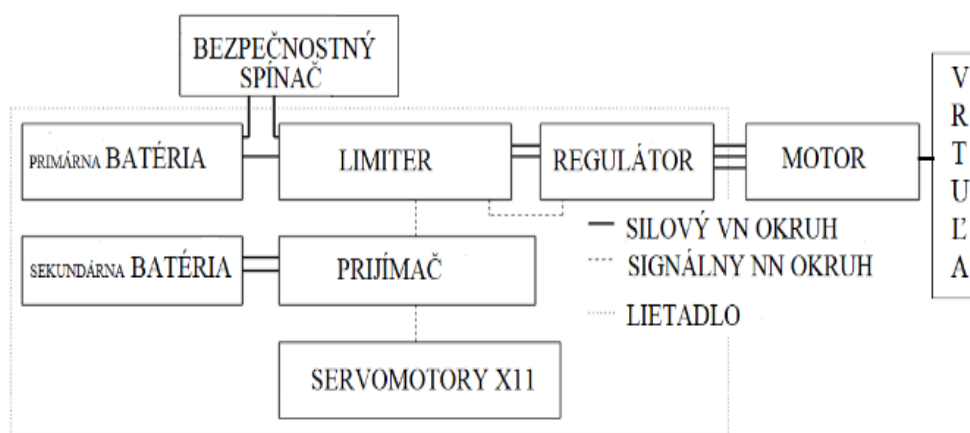
FFS – celková suma bodov za celú letovú časť [-]

Vzhľadom na súbor pravidiel, ktorý je všeobecne platný pre tri po sebe nasledujúce ročníky a z toho vyplývajúcu minimálnu zmenu pravidiel medzi týmito tromi ročníkmi, je možné predpokladať vysokú zhodu pravidiel pre ročník 2022.

2.3. Schéma pohonnej sústavy

Obvod je tvorený primárnym a sekundárnym okruhom čo je možné vidieť na Obr. č. 2-4. Primárny okruh je tvorený silovým VN (vysokonapäťovým) okruhom. V tomto okruhu je hneď za primárnou batériou zaradený bezpečnostný spínač umiestnený podľa pravidiel v 40 % – 60 % dĺžky trupu lietadla na jeho povrchu. Za ním je zaradený limiter, ktorý je pripojený k regulátoru. Zároveň je limiter pripojený signálnym káblom k regulátoru, umiestnenému na vonkajšom plášti trupu, a k prijímaču v sekundárnom obvode. K regulátoru je silovými VN káblami pripojený motor na ktorého hriadeli, resp. unášači je pripevnená vrtuľa.

Sekundárny okruh je tvorený dvojčlánkovou Li-Pol batériou o kapacite 1300 mAh, ktorá napája prijímač a servomotory, ktoré sú v obvode zaradené za prijímačom pomocou signálnych káblov.



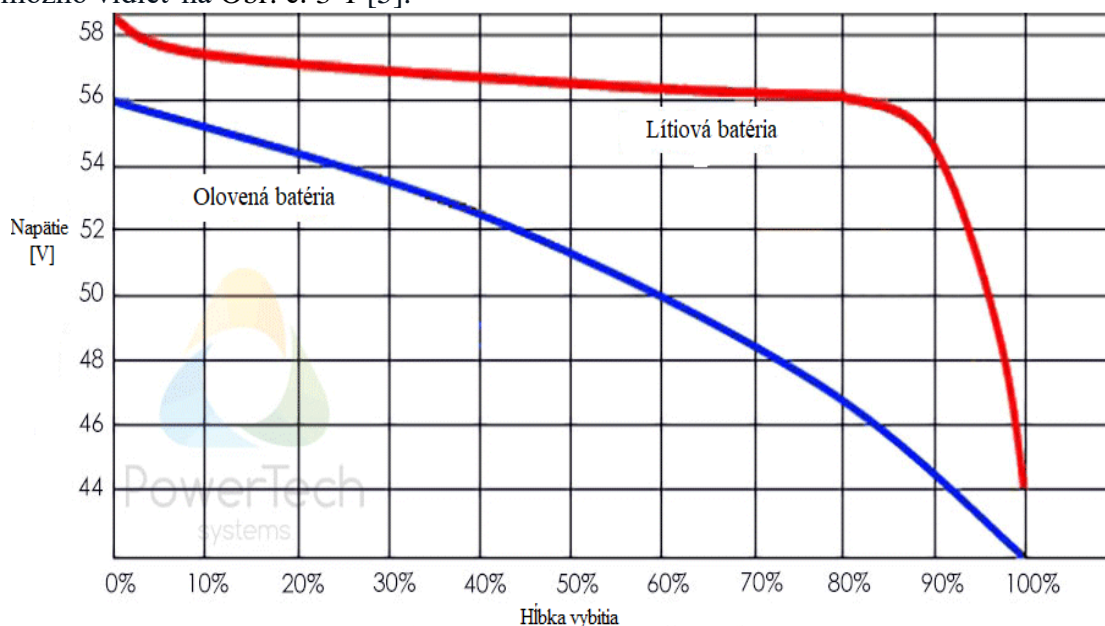
Obr. č. 2-4: Schéma pohonu

3. MODELÁRSKE BATÉRIE

Pri modeloch sa najčastejšie používa niekoľko článkov trvalo spojených do sady, obalených fóliou prípadne v tvrdom obale (hardcase), vybavených spoločnou kabelážou s konektorom na pripojenie batérie k elektrickej výbave modelu, prípadne tiež vybavených tzv. servisným káblom používaným pri nabíjaní. Trvalo spojené monočlánky sa nazývajú akumulátorová sada, resp. akumulátor, RC akumulátor, najbežnejšie však batéria [13].

Každý druh akumulátora má po nabití rôzne dlhú schopnosť uchovať náboj. Po nabití sa akumulátor začne postupne sám vybíjať aj keď nie je pripojený k zariadeniu. Väčší článok má vyšší sklon k samovybíjaniu. Všeobecnou zásadou pri všetkých druhoch batérií je nabíjanie už schladnutých batérií. V závislosti na chemickom zložení sa niektoré batérie samovybívajú viac (napr. akumulátory na báze niklu) ako iné druhy akumulátorov

(napr. akumulátory na báze lítia). Porovnanie vybíjacích kriviek niektorých druhov batérií možno vidieť na Obr. č. 3-1 [5].



Obr. č. 3-1: Vybíjacie krivky batérií [40] (upravené)

Najbežnejšími modelárskymi batériami sú [13]:

- Alkalické primárne
- NiCd (nikel kadmiové)
- NiMH (nikel metalhydridové)
- Li-Pol (lítium polymérové)
- Li-Ion (lítium ionové)
- Li-Fe (lítium železné)
- Pb (olovené)

3.1. Alkalické primárne

V modelárstve sú využívané iba ako palubný zdroj energie pri modeloch so spaľovacím motorom alebo ako zdroj pre vysielace. Tieto batérie sú primárne – bez možnosti opätovného nabitia. Sú známe ako tzv. tužkové batérie s napätím zväčša 1,5 V (záleží na zložení článku) [5]. Vo veľkom sa využívajú v bežnej domácnosti, napríklad v ovládačoch. V modelárstve sa vyskytujú málo, hlavne ako napájanie vysielacov lacných modelov. Ich výhodou je nízka cena, nevýhodou je ich nemožnosť opätovného nabitia [13].

3.2. Nikel kadmiové

Nikel kadmiové batérie boli historicky medzi prvými používanými masovo v RC modeloch, avšak kvôli obsahu kadmia sú v dnešnej dobe v RC modeloch už zakázané. Zakázané boli najmä kvôli škodlivosti k životnému prostrediu. V minulosti boli bežnými najmä v lacnejších nenáročných RC modeloch [13].

Medzi ich nevýhody patrí ich vyššia hmotnosť k pomeru k výkonom, najmä v porovnaní s lítiovými článkami. Majú tzv. pamäťový efekt, čo v praxi znamená, že pred nabíjaním ich treba úplne vybiť, inak strácajú kapacitu. Pri úplnom vybití a nabití sa kapacita stráca len obmedzene. Nové, ale aj dlhšie nepoužívané batérie, musia byť tzv. naformátované, čo znamená ich nabitie veľmi nízkym nabíjacím prúdom. Mnoho nabíjačiek má na formátovanie predvolenú funkciu [13]. Oproti batériam typu NiMh je ich možné nabíjať vyšším prúdom. Z dôvodu samovybíjania (20 % - 25 % za 3 mesiace pri valcových článkoch, pri doskových článkoch 25 % za rok) môže pri dlhodobom skladovaní dôjsť k podvybitiu, po ktorom je ale možné články ešte znova oživiť [5].

Naopak medzi ich výhody patrí ich odolnosť voči nízkym teplotám (pri teplotách nižších ako -20°C je nutnosť použitia hustejšieho elektrolytu), spoľahlivosť a tiež ich robustnosť a odolnosť voči mechanickému poškodeniu. Pri zachovaní pravidiel prevádzky, majú všeobecne udávanú životnosť 500 – 1000 hlbokých cyklov. Sú užívateľsky nenáročné a vďaka nízkemu vnútornému odporu sú schopné poskytnúť relatívne vysoké prúdy (do 50 C) [5].

3.3. Nikel metalhydridové

Hlavne v automodelárstve rozšírený druh. Poskytujú široký rozsah použitia (často nahrádzajú alkalické batérie) s vlastnosťami pre nenáročné použitie akými sú napr. hračkárske modely, fotoaparáty, kamery, ale tiež v dopravných zariadeniach [13].

Ich výhodou je, že sú jednoduché, bezpečné, majú nižšiu citlivosť na nízku teplotu oproti Li - pol batériám, majú vyššiu mernú kapacitu oproti NiCd článkom a sú odolné voči mechanickému poškodeniu [5]. Pri prvom použití je odporúčané akumulátor tzv. naformátovať, tj nabiť ho aspoň prvýkrát veľmi nízkym prúdom (0,1C) [13].

Ich nevýhodou je horší pomer výkonov voči hmotnosti a objemu oproti lítiovým batériám a tiež možnosť iba nízkeho vybíjacieho prúdu (približne 5C) oproti lítiovým ale aj NiCd batériám. Z tohto dôvodu sú v RC modelárstve používané najmä nenáročnými užívateľmi. Výrazne sa u nich prejavuje samovybíjanie (25 % - 40 % za 3 mesiace pri starších typoch) pri dlhodobom skladovaní. Skladujú sa nabité aspoň na 50% ich kapacity, ideálne však v nabitom stave. Životnosť závisí od spôsobu a intenzity používania a tiež nabíjania, všeobecne je udávaná na približne 500 hlbokých cyklov pri poklese kapacity o približne štvrtinu [5].

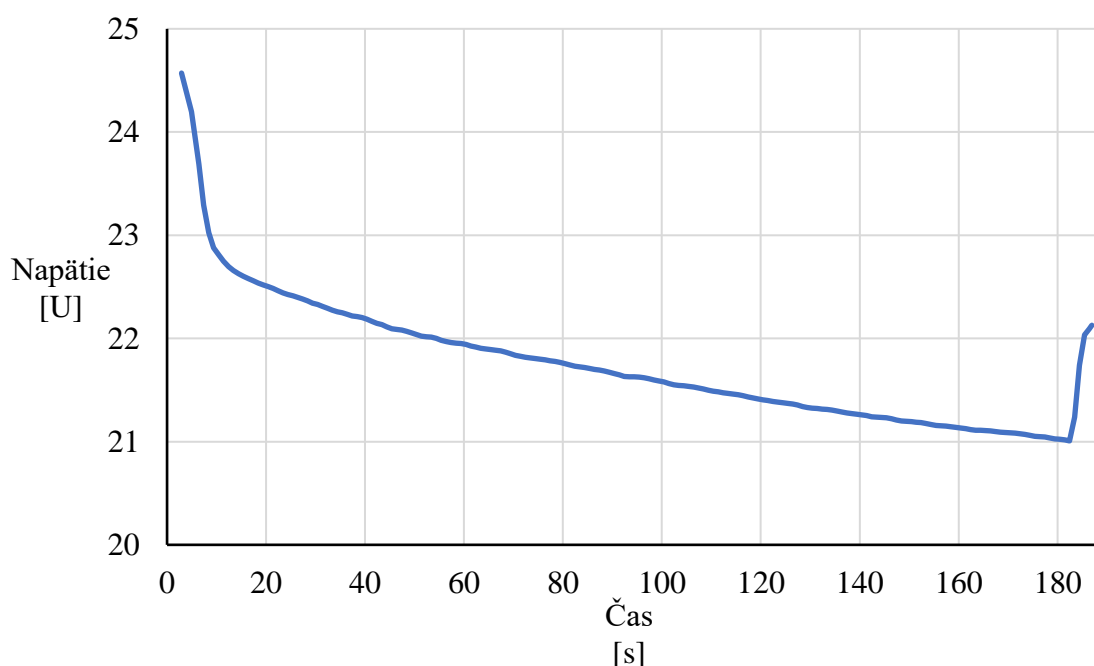
3.4. Lítium-polymérové

Typ akumulátoru, ktorý spôsobil revolúciu najmä v leteckom modelárstve. Oproti ostatným typom ponúkajú neprekonané vlastnosti (vysoká hustota energie, nízka hmotnosť, veľká kapacita a možnosť veľkých vybíjajúcich prúdov). S ich príchodom prišlo

masové rozšírenie elektromodelov lietadiel a dronov všetkých veľkostí. Napätie jedného článku je 3,7 V, avšak existujú aj tzv high voltage Li-Pol akumulátory (HV Li-Pol), ktoré majú napätie na článok zvýšené na 3,8 V. Tieto HV Li-Pol majú najvyšší pomer výkonov ku hmotnosti a objemu z bežne používaných modelárskych batérií [13].

Nabíjané sú pomocou dvoch silových káblov a pomocou servisných (príp. balančných) káblov slúžiacich na riadenie nabíjania. Pri nabíjaní v režime Li-Pol nabíjačka pomocou servisných káblov vyrovnáva napätie článkov, čím prispieva k rovnakému nabitíu každého článku. Nabíjanie bez servisných káblov znižuje životnosť batérie vzhľadom na to, že nabíjacie zariadenie nie je schopné overovať hodnoty napätia (môže dôjsť ku nerovnomernému nabitíu článkov alebo k prebitiu). Odoberanie príliš vysokých prúdov pri používaní taktiež znižuje životnosť batérie [13].

Medzi hlavné výhody patrí veľmi dobrý priebeh vybíjania. V praxi to znamená, že batéria poskytuje rovnomerný (plochý) priebeh prúdu až takmer do úplného vybitia, čo možno vidieť na Obr. č. 3-2. Vďaka nízkemu vnútornému odporu poskytuje vybíjací prúd o vysokých hodnotách (bežne sú dostupné modelárske batérie o hodnotách 60 C - 80 C). Majú výborný pomer výkonov ku rozmerom a hmotnosti a ich samovybíjanie je minimálne (do 3 % - 5 % za mesiac, resp. staršie typy 3 až 5 krát rýchlejšie) [5].



Obr. č. 3-2: Vybíjacia charakteristika batérie Li-Pol (Bighobby NANO 3500mAh)

Batérie je odporúčané skladovať pri nabití na približne 75 % v tzv. storage programe nabíjačiek a pri teplotách nižších ako je izbová teplota. Ak napätie článku klesne pod približne 2,8 V, batéria bude nenávratne poškodená. Jednou z ich najväčších

slabín je citlivosť na poškodenie a nárazy. Pre niektoré použitia (napr. pri RC modeloch áut) sú dostupné tzv. hardcase batérie, čo sú batérie v tvrdých plastových púzdrach [13]. Jedným z najbežnejších prejavov poškodenia Li-Pol batérie je ich vydutie tzv. nafúknutie. Pri výraznejšom vydutí je nutné batériu ihneď vyradiť z prevádzky a zachádzať s ňou s maximálnou opatrnosťou. Hrozí, okrem iného, vznik prudkého požiaru, resp. výbuchu. Aj vďaka tejto vlastnosti je odporúčané mať batérie pri nabíjaní vždy pod dohľadom a na nehorľavej podložke [5].

V porovnaní s niklovými batériami majú menší rozsah prevádzkových teplôt (bežne od -10°C do $+60^{\circ}\text{C}$), ich výkony rýchlo klesajú najmä v nízkych teplotách. Staršie články mali životnosť približne 300 hlbokých cyklov pri poklese kapacity o štvrtinu, ich životnosť sa však neustálym vývojom zvyšuje na stovky cyklov [5].

3.5. Lítium - iónové

Tieto batérie sú prvým masovým typom lítiových batérií, preto majú niektoré vlastnosti podobné ako Li-Pol batérie, líšia sa však v použití. Vybíjací prúd týchto batérií je menší ako pri obdobných Li-Pol batériach. Oproti Li-Pol batériam sú viac odolné voči mechanickému poškodeniu, preto sú vhodnejšie aj pre začiatočníkov, taktiež majú nižšiu cenu. Ich životnosť je približne 350 – 500 hlbokých cyklov, pri poklese kapacity o štvrtinu [5].

Využívajú sa skôr ako napájacie batérie pre zariadenia s nižším odberom (diaľkové ovládače, hračky, ale aj spotrebnej elektroniky). Často sú to napríklad RC modely tankov alebo expedičných špeciálov s motormi o väčšom počte závitov. Odporúča sa ich nabíjať podobne ako Li-Pol batérie [13].

3.6. Lítium - železo - fosfátové

Tieto batérie sa používajú od začiatku tohto storočia. Po počiatočných problémoch s nízkym počtom cyklov sa tieto akumulátory vyvinuli na spoľahlivé akumulátory s extrémne dlhou životnosťou. Oproti Li-Pol akumulátorom majú vysokú bezpečnosť aj vďaka vysokej chemickej stálosti. Sú odolné voči vzplanutiu pri mechanickom poškodení (až do teplôt 400°C). Nedochádza k výbuchom pri poškodení [14].

Výhodou je ich mnohocyklová životnosť (rádovo v tisícoch cykloch aj pri použití ako trakčná batéria) pričom aj po životnosti sú tieto batérie použiteľné v iných, menej náročných aplikáciách. Po znížení kapacity približne o štvrtinu sú schopné funkcie ešte ďalšie tisíce cyklov v zariadeniach kde nedochádza k plnému vybitiu (úložiská energie). Majú široký rozsah prevádzkových teplôt pri zachovaní takmer plnej kapacity (vojenské aplikácie do -20°C). Oproti Pb akumulátorom majú o 30% menšiu hmotnosť pri rovnakej kapacite. Ich hmotnosť v pomere k výkonom je však vyššia ako u Li-Pol akumulátoroch [14].

Napätie jedného článku je 3,3 V, resp. jeho pracovné napätie činí rozsah 2,5 V – 3,6 V. V praxi sa používa ich sériové aj paralelné spojenie, napríklad 6 olovených článkov s napätím 12 V nahradia 4 články Li-Fe-PO₄. Pri zachovaní obmedzeného priestoru je preto možné dosiahnuť vyššej kapacity. V modelárstve sú menej rozšírené ako Li-Pol akumulátory. V modelárstve sú používané pre napájanie palubných systémov alebo vysieláčov. Ich využitie je väčšie napríklad v doprave (elektroautomobily, elektrobicykle, elektroautobusy) alebo ako zdroj energie pri vypnutí hlavného agregátu (karavany, jachty, núdzové osvetlenie, vojenské aplikácie) [14].

3.7. Olovené

Základom oloveného akumulátora je galvanický článok s olovenou elektródou a elektrolytom zo zriedenej kyseliny sírovej. Menšie akumulátory majú často elektrolyt vo forme gélu (tzv. bezúdržbové) alebo vo forme sklenej vaty napustenej v roztoku kyseliny sírovej (AGM – absorbent glass mat). Tieto batérie sa v modelárstve používajú iba pri veľmi veľkých modeloch (lode) alebo ako zdroj na dobíjanie prevádzkových batérií pri lietaní (často sú to klasické autobatérie). Všeobecne sa používajú v dopravných prostriedkoch, záložných zdrojoch alebo manipulačnej technike [5].

Napätie jedného článku je 2,1 V, pričom obvyklé je nasadenie v sadách článkov. Gélové batérie si svoje vlastnosti zachovávajú po väčšinu svojej životnosti, pričom na konci ich životnosti dôjde k ich náhlemu rapídne zhoršeniu. Batérie na bázi AGM svoje vlastnosti strácajú počas celej svojej životnosti. Životnosť olovených batérií je závislá na type ich používania, štartovacie batérie môže zničiť už niekoľko hlbokých vybití, kdežto trakčné batérie sú prispôbené na desiatky hlbokých vybití (pri tretinovom vybití v ráde stoviek cyklov) [50].

Medzi ich výhody patrí možnosť veľkej kapacity pomocou spájania článkov a pomerne malé samovybíjanie (40 % za rok), ktoré je ale závislé od teploty skladovania (pri zvýšení teploty o 10°C platí približne polovičný pokles kapacity). Ich vlastnosti sú menej závislé od okolitej teploty ako Li-Pol batérie ale viac ako Ni-Cd batérie. Nemajú pamäťový efekt ako niklové batérie. Medzi nevýhody patrí veľká hmotnosť a pomalé nabíjanie. Pri nabíjaní vyšším prúdom hrozí poškodenie akumulátora a zníženie kapacity. Pri používaní v režime celého cyklu (úplnom vybití a plnom nabití) sa životnosť akumulátora (najmä štartovacieho) znižuje. Olovené akumulátory sa musia skladovať vždy v nabitom stave. V prípade skladovania v čiastočne vybitom resp. vybitom stave dochádza na elektródach k sulfatácii a následnému zníženiu kapacity. Sulfatácia je vznik kryštálov síranu olovnatého z amorfného síranu vzniknutého pri vybíjaní resp. nabíjaní malými prúdmi na elektródach. Kapacitu možno čiastočne obnoviť upravením nabíjania (mnohé nabíjačky majú program na desulfatáciu) napríklad v forme nabíjania pulzmi vyššieho prúdu [5].

3.8. Analýza batérií

Pri výbere batérie boli zohľadnené pravidlá súťaže, preto boli vybrané iba batérie typu Li-Pol o šiestich článkoch. Určená bola minimálna kapacita batérie 3000 mAh. Batérie Li-Pol sú štandardne dostupné v niekoľkých kapacitných odstupoch. Cieľom letovej misie je preletenie letiskového okruhu. Vzhľadom na premenlivosť miestneho počasia a častého silného vetra, bol uvažovaný vyšší čas letovej misie z dôvodu možného ďalšieho pokusu na pristátie. Uvažovaný čas bol 200 sekúnd letového času .

Veľkosť napätia článku batérie závisí na jeho type, resp. chemickom zložení. Pri spojení do sady sa veľkosť napätia jednotlivých článkov sčítava, tento údaj je následne uvedený obale príp. fólií, ktorou sú články spojené spolu s kapacitou celej batérie napríklad [13]:

6S 3500 mAh 22.2V 60-120C ;

kde: 6S – 6 článkov [-]
3500 – kapacita batérie [mAh]
22.2 – napätie batérie [V]
60C – trvalý vybíjací prúd [A]
120C – špičkový vybíjací prúd [A]

Elektrická kapacita je fyzikálna veličina, označujúca schopnosť prijať elektrický náboj. Pri modelárskych batériách sa udáva najmä v miliampérhodinách (mAh). Každá batéria má rôzny vnútorný odpor. Platí, že čím má akumulátor nižší odpor, tým vyšší prúd vie dodať. Vybíjací prúd označuje veľkosť vybíjacieho prúdu ako násobku kapacity. Preto platí, že batéria o kapacite 1000 mAh a vybíjacom prúde 50 C pri používaní dokáže dodať prúd 50 000 mAh resp. 50 A. Pre použitie v súťažnom lietadle tímu Chicken Wings boli uvažované batérie o čo najvyšších hodnotách vybíjacieho prúdu (45 C a viac). Pri limiterom obmedzenom príkone 1000 W je možné strednú hodnotu prúdu vypočítať zo vzorca (3.1) [8]:

$$P = U \cdot I ; \quad (3.1)$$

z čoho vyplýva:

$$I = \frac{P}{U} = \frac{1000}{22,2} = 45,05 ; \quad [A]$$

kde: P – príkon [W]
I – prúd [A]
U – napätie [V]

Pri približných výpočtoch batérie súťažného lietadla, ktoré sa bude väčšinu doby letu pohybovať na svojich prevádzkových maximách, je možné vychádzať zo zjednodušeného vzorca pre kapacitu pri vybíjaní konštantným prúdom, ktorý pre približné výpočty kapacity batérie v rádoch stoviek mAh postačuje. Pri tomto prvotnom hrubom výpočte kapacity možno vychádzať zo vzorca (3.2) [12]:

$$C = I \cdot t \quad (3.2)$$

z čoho vyplýva: $C = 45,05 \cdot \frac{200}{3600} \cdot 1000 = 2503$ [mAh]

kde: C – kapacita batérie [Ah]
 I – prúd [A]
 T – čas [h]



Obr. č. 3-3: Batéria Bighobby Nano Tech 3500mAh 22.2V 60C (120C) [41]

Z prvotného výpočtu kapacity batérie vyplýva, že batéria o minimálnej požadovanej kapacite je postačujúca. V ročníku 2020 bola použitá batéria o kapacite 3500 mAh. Táto kapacita bola preukázaná ako dostačujúca pre použitie v kombinácii s motorom AXI 5330/20 a vrtulou APC 20x8 E. Pre merania bola použitá práve batéria zhodného typu a kapacity od výrobcu Bighobby Nano Tech s charakteristikami 3500mAh 22.2V 60C (120C) [25].

Tab. č. 2: Porovnanie základných technických parametrov uvažovaných batérií [22],[23],[24]

Batéria	Bighobby NanoTech	Dualsky ULTRA70	GENS ACE	Jednotky
Vybíjací prúd	60C (120C)	70C (140C)	60C (120)	[A]
Kapacita	3500	3300	3700	[mAh]
Hmotnosť	585	533	5500	[g]
Rozmery	142x43,5x48	138x43x43	137x42x42	[mm]
Cena	1977	2460	2359	[Kč]

Vo výpočtoch bola nastolená hypotéza závislosti veľkosti prúdu na priemere a stúpaní vrtule. Táto hypotéza bola neskôr pri meraniach overovaná. Pri meraniach bola tiež kontrolovaná potrebná veľkosť kapacity v závislosti od použitej vrtule. V Tab. č. 2 je uvedené porovnanie parametrov Li-Pol batérií rôznych kapacít približne vhodných pre dané použitie. V ich porovnaní možno vidieť, že hmotnosť a rozmery batérie sa so zvyšujúcou kapacitou zvyšujú, preto je výber batérie pre súťažné použitie často kompromisom medzi dostatočnou kapacitou a čo najnižšou hmotnosťou. V závislosti od konštrukcie modelu, vyššia hmotnosť batérie býva niekedy použitá na vyváženie lietadla, resp. na dosiahnutie lepšej polohy ťažiska.

4. MOTORY

Energia potrebná pre dopredný pohyb modelu, jeho zrýchlenie alebo stúpanie je získavaná dvoma spôsobmi. Prvým je princíp využitia premeny energie polohovej na energiu kinetickú (výška za rýchlosť), čo je využívané klzákmi. Tento spôsob je obmedzený vonkajšími (najmä poveternostnými podmienkami) a tiež nie je vhodný pre niektoré druhy lietania. Druhým je využitie energie od pohonnej skupiny [3].

Podľa princípu získavania ťahovej energie delíme pohon na vrtuľový a tryskový. Pri tryskovom pochádza ťahová energia priamo od motora, kdežto pri vrtuľovom je ťahová energia tvorená kombináciou motora so zariadením na prenos jeho mechanického výkonu na ťah [17]. Princípom vzniku ťahu je urýchľovanie pracovnej hmoty pohonnou skupinou, teda zmena hybnosti prúdu pracovnej hmoty pred a za telesom. V prípade modelov lietadiel je touto hmotou okolitý vzduch (pre vrtuľové alebo prúdové pohony) alebo samotná pohonná látka (raketový motor) [4]. Pre rovnaký ťah platí, že vrtuľové pohony využívajú menšie zrýchlenie väčšieho objemu hmoty, pričom tryskové motory dodávajú menšiemu objemu hmoty väčšie zrýchlenie [3].

Podľa druhu pohonu sa používajú motory spaľovacie, elektrické, na stlačený plyn, prípadne je vrtuľa otáčaná pomocou natočeného gumového zväzku [3]. Pri RC modeloch sú v súčasnosti využívané najmä piestové spaľovacie motory, elektromotory, EDF dúchadlá (electric duct fan), raketové motory a pre jednoduchšie, ľahšie modely aj gumový zväzok. Prúdové, turbovrtuľové, poprípadе náporové motory sa používajú v malej miere pri veľmi pokročilých modeloch. Výber motoru sa zväčša odráža od výberu vrtule, resp. požiadaviek na ňu kladených [8].

4.1. Piestový spaľovací motor

Kedysi najpoužívanjší motor v leteckom modelárstve, dnes je vytláčaný elektromotormi. Najpoužívanjšie spaľovacie motory v súčasnosti sa delia spôsobom zapálenia zmesi a druhom spaľovaného paliva na žhaviace (GLOW engine) a benzínové. Oba typy môžu byť dvojtaktné alebo štvortaktné. Dvojtaktné majú pri rovnakom objeme nižšiu hmotnosť a vyšší výkon, štvortaktné majú vyššiu účinnosť, kultivovanejší chod a pracujú pri nižších otáčkach. Výhodou spaľovacích motorov je možnosť dlhodobého stáleho chodu v rôznych pracovných režimoch, obmedzená len veľkosťou nádrže. Pri porovnaní s elektromotorom má ich palivo stále vyššiu energetickú hustotu. Nevýhodou ich prevádzky je komplikovanejšia obsluha a tiež znečistenie modelu od ich prevádzky [16]. Prácu spaľovacieho motora možno popísať podľa vzorca (4.1) [3]:

$$P = 2\pi \cdot M_k \cdot n ; \quad (4.1)$$

kde: P – výkon [W]
 M_k – krútiaci moment na hriadeľ [Nm]
 n – otáčky motora za sekundu [s^{-1}]

4.1.1. Žhaviace

Žhaviace (GLOW) motory sú vybavené žhaviacou sviečkou s vláknom z teple odolného kovu. Vďaka absencii zapalovania sú tieto motory ľahšie ako benzínové. Vláknko sa pred naštartovaním nažhaví z externého zdroja, počas behu motora sa priebežne žhaví horením paliva vo valci. Pri dlhšom behu na voľnobeh môže toto vlákno vychladnúť. V prevádzke sa zmes stlačí a následne zapáli od žhaviaceho vlákna. Palivo je zmesou metylalkoholu a oleja, pričom sa pre zlepšenie chodu do tejto zmesi pridáva tiež 5 – 30% nitrometánu. Nitrometán je korozívny, preto sa odporúča pri dlhšom nepoužívaní motor zakonzervovať. Vyrábajú sa v menších objemoch ako benzínové, pri rovnakom objeme majú vyšší výkon ako benzínové [16].

4.1.2. Benzínové

Modelárske benzínové motory fungujú na rovnakom princípe ako veľké benzínové motory. Elektronické zapalovanie môže fungovať na bázi magneta alebo je elektrina na zážih dodávaná z externého zdroja. Veľkosť objemu motora je čiastočne obmedzená veľkosťou sviečok, preto nie je možné dosiahnuť tak malého objemu ako pri žhaviacich motoroch. Najmenšie objemy sa pohybujú od 10 cm³ vyššie. Palivom je zmes benzínu a oleja. Výhodou je dostupnosť a cena paliva. Benzínové motory tiež nie je nutné zakonzervovať pri dlhšej odstávke ako motory žhaviace [16].



Obr. č. 4-1: Motor GP 38 - benzínový jednovalcový motor o obsahu 38cm³ [42]

4.2. Elektrické motory

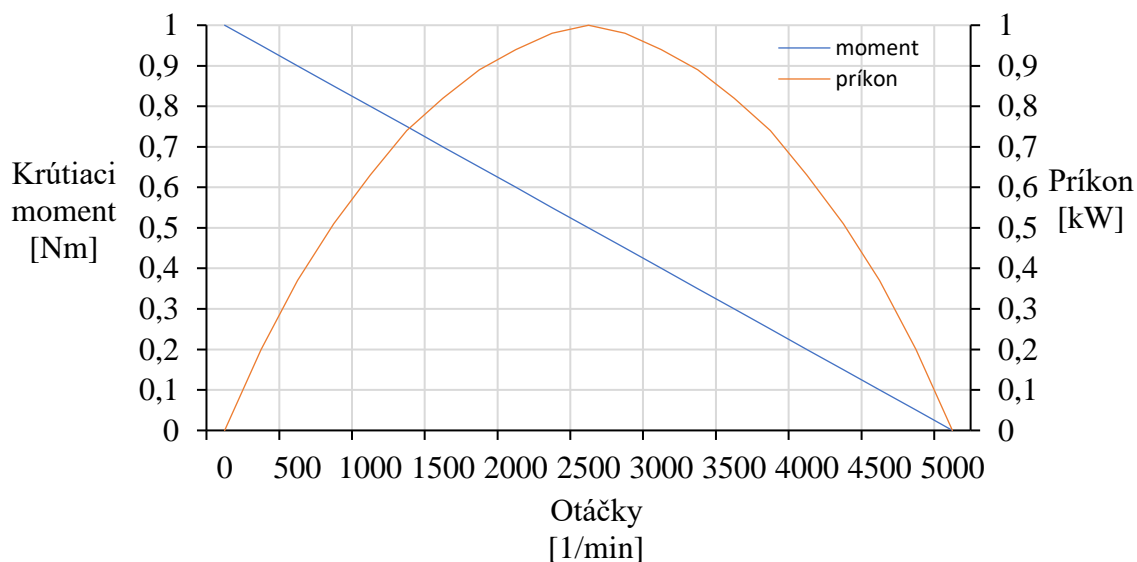
V súčasnej dobe sa pri leteckých RC modeloch používa najmä bezkontaktný elektricky komutovaný jednosmerný motor (BLDC). Spolu s ním je nutné do schémy pohonu zaradiť aj elektronický regulátor [8].

BLDC motor je typ synchronného jednosmerného motoru, ktorý používa namiesto komutátoru striedač, ktorý vytvára pulzy v cievkach statoru tak, aby sa motor roztáčal, čím sa vytvára točivé magnetické pole. Skladá sa z niekoľkých častí, pričom

stator a rotor sú najdôležitejšie pre dosiahnutie otáčania. Stator je nehybná časť, ktorá je pevne uchytená o model, resp. do motorovej lôže. Na statore sú navinuté cievky s jadrom z magneticky mäkkého materiálu. Prechod prúdu cievkou vytvára elektromagnet. Spolu s hriadeľom motoru je spojená rotačná časť – rotor. Má v sebe zabudované permanentné neodýmové magnety. Privádzaním troch fázovo posunutých prúdov o 120° s vlnovým priebehom napätia na cievku – elektromagnet, dôjde k zmene polarity. Tie priťahujú resp. odpudzujú magnety na rotore, čo vedie k rotácii rotora [11]. Podľa konštrukcie delíme BLDC motory na Inrunner a Outrunner. Pri motoroch typu Inrunner sú cievky v plášti a rotor sa nachádza vnútri. Tieto motory dosahujú vyšších otáčok, používajú sa napríklad pre pohon dýchadiel. Motory typu Outrunner majú rotujúci plášť s magnetmi pričom stator s cievkami sa nachádza vnútri. Oproti motorom typu Inrunner dosahujú nižších otáčok ale vyššieho krútiaceho momentu [15].

BLDC motor dosahuje tichého chodu, vysokej účinnosti, bezporuchovosti a dlhej životnosti, obmedzenej prakticky len životnosťou ložísk. Oproti svojmu predchodcovi, kontaktnému resp. interne komutovanému elektrickému motoru, pri nižšej hmotnosti ponúka väčší rozsah otáčok a plochú krivku krútiaceho momentu vzhľadom k rýchlosti [15]. S vyšším počtom cievok alebo zväčšením magnetov, možno dosiahnuť väčšieho krútiaceho momentu za cenu nižších otáčok motoru. Toho sa využíva napríklad pri konštrukcii veľkých multikoptér, kde to umožňuje použitie vrtule väčšieho priemeru [8].

Z Obr. č. 4-2 možno pri stálom príkone bez zaťaženia vyčítať, že so zvyšujúcou sa rýchlosťou, krútiaci moment klesá. Maximálny výkon je dosiahnutý približne v polovici otáčok a polovici krútiaceho momentu [11].



Obr. č. 4-2: Charakteristika BLDC motoru (vytvorené na základe [44])

Väčšina motorov je popisovaná tzv. KV číslom resp. konštantou, ktorá značí počet otáčok na jeden volt v nezaťaženom stave. Skutočné otáčky v zaťaženom stave sú o niečo

nižšie a so zaťažovaním sa ďalej znižujú. Prúd pri najlepšej účinnosti sa nezhoduje s prúdom pri najväčšom výkone. Motor a počet článkov je volený na základe požadovaných otáčok v prevádzkovanom stave. Všeobecne platí, že pre malý počet článkov bývajú volené skôr motory s vyšším KV číslom a pre veľký počet článkov skôr motory s nižším KV. Pri nevhodne zvolených otáčkach sa motor môže točiť zbytočne vysokými otáčkami, pri ktorých je nutné pridať buď prevodovku alebo použitá vrtuľa môže pracovať v režime nízkej účinnosti. Opačný prípad nastane, keď by boli otáčky motora príliš nízke, čo čiastočne možno kompenzovať zväčšovaním priemeru vrtule, ktoré je ale často obmedzené výkonom motora [8].

Maximálny prúd je daný najmä prierezom vinutia, ktoré sa nesmie prehrievať (klesá účinnosť), rozmermi magnetov a KV číslom. Platí, že rovnaký motor s viac závitmi má nižšiu prúdovú zaťažiteľnosť a nižšie otáčky. Rozdiel medzi príkonom a výkonom sú straty (napr. tepelné, mechanické alebo energetické). Dôležité je preto zabezpečiť dostatočné chladenie celej pohonnej sústavy, v prípade prílišného zahrievania nejakej časti pohonnej sústavy je v záujme bezpečnosti a zachovania životnosti prehodnotenie celého pohonu alebo jeho časti [8].

Vhodná veľkosť príkonu závisí na spôsobe letu resp. používaní a hmotnosti modelu [8]:

100 – 140 W/kg	- minimálny výkon vhodný pre modely typu slow a park flyer
140 – 180 W/kg	- modely s malým prebytkom výkonu, tréneri, pomalé makety
180 – 220 W/kg	- modely pre základnú akrobáciu, rýchle makety
220 – 260 W/kg	- modely pre akrobáciu, rýchle modely
260 – 300 W/kg	- modely pre 3D akrobáciu, dúchadlá
300 + W/kg	- modely pre neobmedzenú akrobáciu

4.3. Analýza motorov

Pri výbere motora boli na základe dobrých minulých skúseností, dobrých výkonov a celkovej kvality uvažované motory od českého výrobcu AXI MODEL MOTORS (ďalej len AXI). Firma je v modelárskom kruhu známym výrobcom kvalitných BLDC elektromotorov. Tento výrobca je tiež jedným z dlhodobých sponzorov tímu Chicken Wings. Pre použitie v lietadle pre ročník 2022 boli uvažované motory z dvoch rôznych sérií, konkrétne motory série 41 a 53. Výrobca motorov AXI používa pre svoje motory označenie v zmysle [19]:

AXI DDLL/XX

napr.

AXI 5325/20

kde:	DD	– priemer statoru [mm]
	LL	– dĺžka statoru [mm]
	XX	– počet závitov [-]

Zjednodušene je možné povedať, že výkon sa zväčšuje s priemerom resp. dĺžkou statora. Motory s vyšším počtom závitov majú všeobecne nižšie otáčky a nižší prúd pri maximálnej účinnosti. Pri výbere motorov bola postavená hypotéza o schopnosti motorov dosiahnutia spoľahlivej prevádzky s vrtuľami o väčšom priemere ako sú odporúčané výrobcom. Podľa technických parametrov poskytovaných výrobcom, sa motory AXI 5325/20 a AXI 4120/18 ukázali vo svojich sériách ako kompromis s dostatočným KV číslom, výkonom, účinnosťou a veľkosťou prúdu pri maximálnej účinnosti. Bolo predpokladané, že výrobcom udávané hodnoty v spojení s týmito vrtuľami nebudú dosiahnuté, pričom môže byť narušená spoľahlivosť prevádzky motora (očakávané najmä pri motore série 41). Tieto parametre boli následne zistené pri meraní. V nižšie uvedenej Tab. č. 3 sú uvedené základné technické parametre uvažovaných motorov AXI 5325/20 a AXI 4120/18 od výrobcu [19].

Tab. č. 3: Porovnanie základných technických parametrov uvažovaných motorov [20],[21]

	jednotky	AXI 5325/20	AXI 4120/18
KV	[ot / min·V]	280	515
max. účinnosť	[%]	94	89
prúd pri max. účinnosti	[A]	15 - 65	15 - 40
max. prúd. zaťažiteľnosť/čas	[A / s]	79 / 60	59 / 60
rozmery (priemer x dĺžka)	[mm]	63 x 63,2	49,8 x 54,4
hmotnosť	[g]	595	315
max. výkon	[W]	2430	1500
cena	[Kč]	5890	3499

5. REGULÁTOR

Jednosmerný komutátorový motor sa skladá z komutátoru, vinutia na kostre a magnetov. Pre dosiahnutie otáčania, komutátor skokovo prepína zmysel smeru prúdu vo vodiči. Impulzy sú obdĺžnikového tvaru. Pri BLDC motoroch sa miesto kontaktného komutátora používa bezkontaktný elektronický. Pri bezkontaktnom elektronickom komutátore odpadá mechanická časť, zvyšuje sa jeho životnosť, spoľahlivosť a tiež je možné ho programovať [8].

V základnej schéme pohonu, ktorú je možné vidieť na Obr. č. 2-4, je vysielateľom vyslaný riadiaci signál prijatý prijímačom. Následne je signál vyslaný do regulátoru, ktorý následne riadi motor. Na obrázku č. 4 je možné vidieť schému zapojenia elektroniky v súťažnom lietadle. Otáčky sú dané šírkou pulzu, obvykle v rozmedzí 1000 μ s až 2000 μ s a sú úmerné výchylke plynovej páky [38]. Pri pokročilejších vysielateľoch možno naprogramovať krivku riadenia plynu a nastavenie koncových bodov, resp. možno regulátor naprogramovať pre režim najvhodnejší pre dané použitie. Pri výbere regulátoru je potrebné dbať na to aby jeho maximálny prúd bol vyšší ako maximálny prúd vyžadovaný pohonnou sústavou [8].

Regulátor je bežne možné programovať tromi spôsobmi. Prvým je pomocou vysielача, kde pomocou plynovej páky a zvukových signálov je možné nastaviť požadované parametre funkcií (podľa návodu jednotlivých typov regulátorov). Medzi nevýhody tohto spôsobu patrí najmä jeho zdĺhavosť a neprehľadnosť. Pokročilejším je programovanie pomocou programovacej karty pripojenej k signálnemu káblu. Je užívateľsky jednoduchý, avšak stále absentuje možnosť kompletného nastavenia. Najpokročilejším spôsobom je programovanie pomocou počítačového programu, ktoré umožňuje nastavenie presných veľkostí parametrov funkcií [8].

Pri výbere regulátoru boli zvažované regulátory od českej firmy JETI model s.r.o. najmä z dôvodu ich kvality, kompatibility s ďalším tímovým zariadením a skúsenosťami s ním v tíme. Firma JETI model s.r.o. má taktiež obchodné zastúpenie v USA priamo na Floride, preto bola z ich strany ponúknutá miestna pomoc v prípade komplikácií s ich zariadeniami. Tím Chicken Wings s touto firmou tiež dlhodobo spolupracuje. Výrobky od firmy JETI model s.r.o. sú v RC modelárskej komunite celosvetovo známe a oceňované ako výrobky najvyššej kvality a špičkových výkonov.

5.1. Analýza regulátorov

Vzhľadom ku veľkosti vypočítaného elektrického prúdu podľa vzorca (3.1) o hodnote 45,05 A, boli zvažované regulátory s hodnotami maximálneho prúdu nad 50 A. Regulátory značky JETI sú dostupné v niekoľkých radách podľa použitia, veľkosti prúdu, informácií a funkcií poskytovaných užívateľovi. Pre testovanie a skúšobné lety bola zvolená najvyššia rada MEZON Pro OPTO, ktorá má zabudovanú telemetriu. Pomocou telemetrie je možné sledovať a prípadne ovládať resp. nastaviť funkcie pre zlepšenie efektivity prevádzky. Telemetriu je pravidlami zakázané používať, je však výhodná pre nastavenie optimálnych funkcií pohonu počas skúšobných letov.



Obr. č. 5-1: Regulátor MEZON Pro OPTO 55 [45]

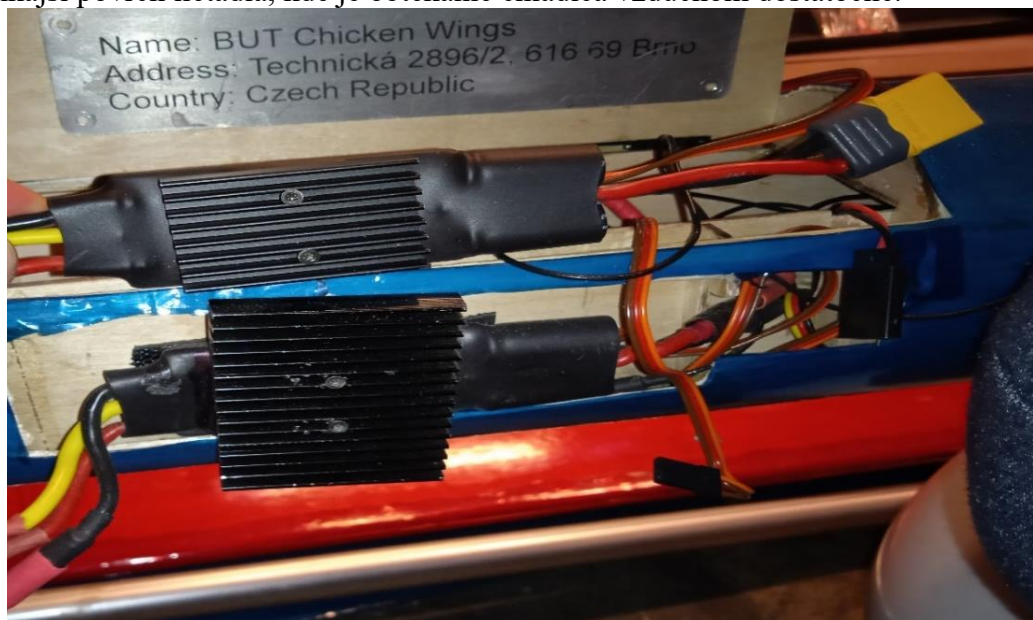
Označenie OPTO pri regulátoroch JETI označuje regulátory bez integrovaného obvodu stabilizovaného napätia (BEC – Battery Eliminator Circuit) pre napájanie prijímača a servomotorov. Pri absencii tohto obvodu je nutné, pre napájanie prijímača, servomotorov prípadne inej elektroniky iného napätia než poskytuje primárna batéria,

použiť sekundárnu batériu o napätí vhodnom pre napájanie týchto súčastí, prípadne použiť iný stabilizátor napätia. Regulátory rady OPTO majú zabezpečené oddelenie obvodu primárnej a sekundárnej batérie [26]. Bežne sa používajú najmä pri napájaní vyššieho počtu servomotorov, resp. pri modeloch s veľkým prúdovým odberom a napätím. Vzhľadom k použitiu sekundárneho obvodu pre napájanie prijímača a servomotorov pri lietadle na súťaž SAE Aero Design, je regulátor rady MEZON Pro OPTO vyhovujúci. V Tab. č. 4 sú uvedené technické parametre regulátorov udávaných výrobcom [26].

Tab. č. 4: Porovnanie základných parametrov uvažovaných regulátorov [27],[28]

Regulátor	MEZON 55 Pro OPTO	MEZON 85 Pro OPTO	Jednotky
Hmotnosť	90	90	[g]
Rozmery	26 x 23 x 83	26 x 23 x 83	[mm]
Trvalý prúd	50	80	[A]
Cena	3040	5330	[Kč]

Najmä z dôvodu ceny, bol zvolený regulátor MEZON 55 Pro OPTO (Obr. č. 5-1). Pre použitie a testovanie bolo dodatočne vylepšené chladenie, inštaláciou upraveného chladiča väčšieho rozmeru z regulátoru väčšieho rozmeru. Úpravu možno vidieť na Obr. č. 5-2. Táto inštalácia bola prevedená taktiež kvôli zlepšeniu chladenia pri meraní statického ťahu, kde chladič regulátoru nie je dostatočne obtekaný a teda chladený prúdiacim vzduchom. Táto inštalácia sa ukázala ako potrebná, po jej prevedení bolo už chladenie regulátoru dostatočné. Pri skutočnej prevádzke je nutná inštalácia regulátoru na vonkajší povrch lietadla, kde je obtekanie chladiča vzduchom dostatočné.



Obr. č. 5-2: Porovnanie originálneho (horný) a upraveného (spodný) regulátora

6. LIMITER

Limiter je súčiastka vyžadovaná pravidlami súťaže zaradená v obvode za batériu, ktorá obmedzuje príkon prechádzajúci do regulátora, s ktorým je prepojená silovými a signálnymi káblami. Rovnako je prepojený signálnymi káblami s prijímačom. Funguje na princípe merania napätia a elektrického prúdu, z ktorého je následne vypočítaný príkon. Na základe veľkosti príkonu následne obmedzuje PPM (veľkosť časových rozostupov medzi pulzami). Je dodávaný sponzorom súťaže, firmou NeuMotors, jednotlivým účastníkom. Limiter možno vidieť na Obr. č. 6-1.

Podľa pravidiel musí byť umiestnený na viditeľnom a dostupnom mieste pre prípadnú inšpekciu. Jeho funkčnosť signalizuje svietiaci dióda. Jedným z cieľov práce bolo zistenie správania sa limiteru v okolí a nad hraničnou hodnotou príkonu 1000 W.



Obr. č. 6-1: Limiter NeuMotors V2 SAE 2019 1000 W [49]

7. VRTUĽA

List vrtule je v podstate rotujúce krídlo veľkej štíhlosti, ktorý ohýba prúd vzduchu podobne ako krídlo, pričom na konci listu vznikajú okrajové víry. Je uchytený v náboji hriadeľa motoru. List je obvykle skrútený [4]. Profil listu vrtule, jeho hĺbka a hrúbka sa po jeho dĺžke mení, preto sa pri výpočtoch zjednodušene používa profil v 70 % - 75 % polomeru listu. Aerodynamické charakteristiky obtekania tohto profilu sú podstatné pre výkony vrtule [3]. Kruhovú plochu opisovanú točiacou sa vrtuľou sa nazýva vrtuľovým kruhom. Každý bod listu vrtule koná zároveň transláciu a rotáciu a pohybuje sa po dráhe v tvare skrutkovice [8]. Vrtuľa ovplyvňuje prúdenie vzduchu v okolí vrtuľového kruhu ale aj pred ním a za ním. Ťah vzniká na základe princípu vety o zmene hybnosti, ktorú možno vyjadriť vzorcom (7.1), [6] resp. (7.2), [4]:

$$T = M \cdot \Delta v ; \quad (7.1)$$

$$\text{resp.} \quad T = \rho \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{8} \cdot (v_2^2 - v_0^2) \quad (7.2)$$

- kde: T – ťah [N]
 M – hmotnostný tok vzduchu prúdiaceho vrtuľovým kruhom [kg/s]
 D – priemer vrtule [m]
 ρ – hustota vzduchu (resp. pracovnej hmoty) [kg/m³]
 v_2 – výstupná rýchlosť prúdu vzduchu, resp. rýchlosť za vrtuľovým kruhom [m/s]
 v_0 – rýchlosť nasávaného prúdu vzduchu, resp. letová rýchlosť [m/s]

7.1. Geometrické vlastnosti

Geometrické stúpanie vrtule je vzdialenosť o ktorú sa rovina tvorená vrtuľovým kruhom posunie v smere osi rotácie, pri jednej celej rotácii listu. Pri značení modelárskych vrtulí sa bežne používa značenie vo forme priemer \times stúpanie. Stúpanie možno analogicky prirovnať k uhlu nábehu krídla a vypočítať zo vzorca (7.3) [4]:

$$P_D = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot tg(\beta) ; \quad (7.3)$$

- kde: P_D – stúpanie vrtule [m]
 r – vzdialenosť výpočtového profilu od osi vrtule (typicky 75 % r) [m]
 β – uhol nastavenia listu vrtule [°]

Uhol nábehu vrtuľového listu α je definovaný ako uhol nabiehajúceho prúdu vzduchu na profil a spojnicu nábežnej a odtokovej hrany profilu. Rovnaké stúpanie dvoch vrtulí ale neznamená rovnaký uhol nastavenia [4]. Zmena uhlu sa výrazne prejaví na charakteristike vrtule. Pri pevných vrtuliach je preto dôležitým údajom uhol natočenia, resp. uhol nastavenia listu β (ten je dôležitý aj pri staviteľnej vrtuli, avšak pri staviteľnej vrtuli je tento uhol možno meniť v priebehu letu, čo pri pevnej vrtuli možné nie je). Uhol nastavenia β sa pozdĺž listu vrtule mení, pre výpočty je braný profil zvyčajne v 75 % (príp. 70%) dĺžky listu v smere od osi vrtule (napr. vrtuľa 8×4 bude mať rovnaký uhol nastavenia ako vrtuľa 16×8) [8]. V Tab. č. 5 sú uvedené vypočítané uhly nastavenia β podľa vzorca (7.4) pre uvažované vrtule rôzneho priemeru a stúpania. Uhol nastavenia β možno pri znalosti veľkosti stúpania a priemeru vypočítať zo vzorca [2]:

$$\beta = \arctg \left(\frac{P_D}{2 \cdot \pi \cdot \frac{r}{R} \cdot D} \right) ; \quad (7.4)$$

$$\text{napr.:} \quad \beta = \arctg \frac{8}{2 \cdot \pi \cdot 0,75 \cdot 10} = 9,64^\circ ; \quad [^\circ]$$

vrtuľa 20x8:

- kde: β – uhol nastavenia listu vrtule [°]
 P_D – stúpanie vrtule [m]
 D – priemer vrtule [m]
 $\frac{r}{R}$ – poloha výpočtového profilu od osi vrtule (typicky 75 % resp. 0,75) [-]

Tab. č. 5: Vypočítané uhly nastavenia pre vrtule rôznych rozmerov [32],[33],[34],[35],[36],[37]

Rozmer vrtule	Priemer	Stúpanie	Uhol nastavenia
	[mm ; in]	[mm ; in]	[°]
19x8	482,6 ; 19	203,2 ; 8	10,13
20x8	508 ; 20	203,2 ; 8	9,64
20x11	508 ; 20	279 ; 11	13,14
22x10	558,8 ; 22	254 ; 10	10,92
24x12	609,6 ; 24	304,8 ; 12	11,98

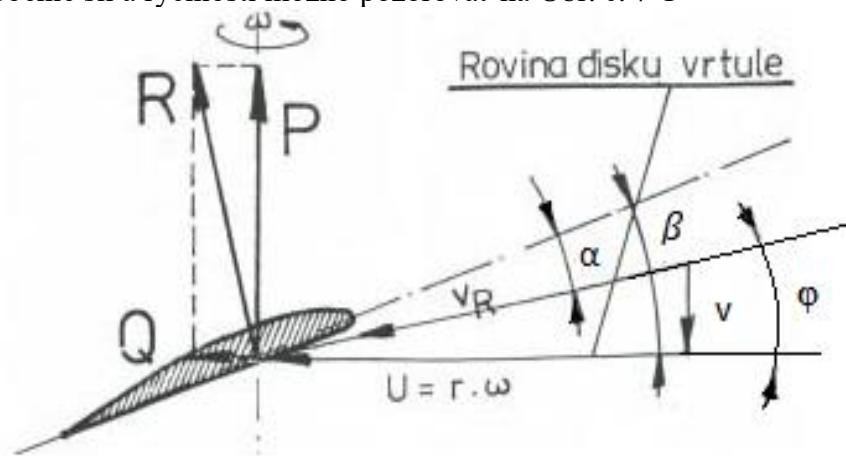
Spolu s uhlom nastavenia sa v dôsledku zmeny uhlovej rýchlosti pozdĺž listu vrtule mení aj uhol postupu φ . Pri nulovej rýchlosti je uhol nábehu α a uhol nastavenia β zhodný. Pri zvyšujúcej sa doprednej rýchlosti uhol nábehu α klesá. Vzťah (7.5) medzi uhlami možno napísať vo forme [4]:

$$\beta = \varphi + \alpha \quad (7.5)$$

kde: β – uhol nastavenia listu vrtule [°]
 α – uhol nábehu vrtuľového listu [°]
 φ – uhol postupu profilu [°]

Na stúpaní vrtule toho istého priemeru je závislá dopredná rýchlosť. Vrtuľa s menším stúpaním bude mať lepšie zrýchlenie z nulovej rýchlosti, pri vyšších rýchlostiach bude aerodynamická sila ňou vyvodzovaná už príliš malá pre ďalšie zrýchlenie. Pri použití príliš malého stúpania pre výkon vrtule môže profil dosiahnuť vo vyšších rýchlostiach príliš malého (v extrémne až záporného) uhlu nábehu, pri ktorom bude vrtuľa produkovať nedostatočný (resp. žiadny príp. záporný) ťah. Naopak vrtuľa s veľkým stúpaním bude dosahovať vysokú doprednú rýchlosť, pri vzlete bude ale poskytovať menšie zrýchlenie. Pri príliš veľkom stúpaní môže dôjsť k odtrhávaniu prúdenia, výsledkom je zníženie ťahu a potreba väčšieho krútiaceho momentu [4]. Z toho vyplýva, že pevná vrtuľa je vyberaná pre najlepšie použitie v požadovanej fáze letu (napr. pre výsadky, vlekanie vetroňov, dlhý prelet, atď.). Vysoká efektivita v rôznych letových fázach je zaručená použitím staviteľnej vrtule, ktorá mení uhol nastavenia v priebehu letu, čo možno vidieť na Obr. č. 7-2 [6].

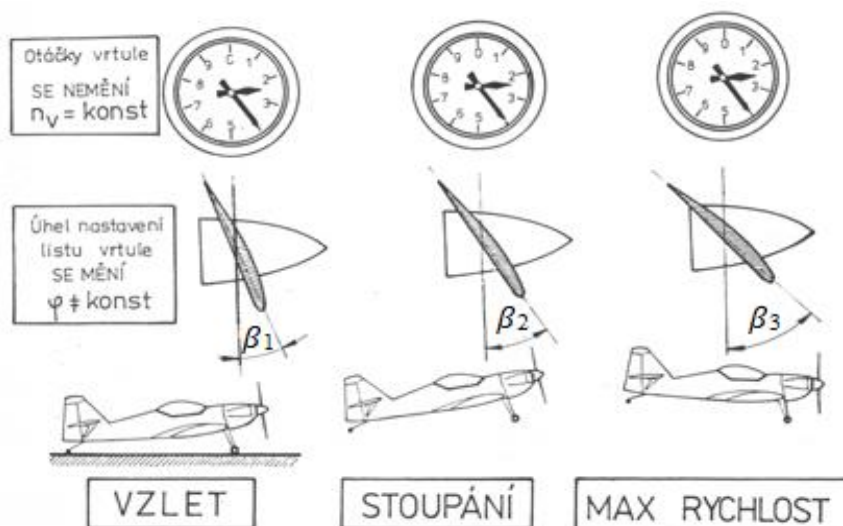
Uhly, pôsobenie síl a rýchlostí možno pozorovať na Obr. č. 7-1



Obr. č. 7-1: Sily, uhly a rýchlosti pôsobiace na profil vrtuľového listu [46] (upravené)

kde:	P	– ťah vrtule [N]
	Q	– odpor proti otáčaniu vrtule [N]
	R	– výsledná aerodynamická sila [N]
	v	– dopredná rýchlosť lietadla [m/s]
	U	– obvodová rýchlosť bodu na vrtuli [m/s]
	v_r	– výsledná rýchlosť profilu [m/s]
	β	– uhol nastavenia listu vrtule [°]
	α	– uhol nábehu vrtuľového listu [°]
	φ	– uhol postupu profilu [°]

Staviteľná vrtuľa prakticky odstraňuje problémy pevnej vrtule. Listy staviteľnej vrtule sa vo vrtuľovej hlave môžu natáčať okolo vlastnej osi, čím sa mení uhol nastavenia vrtule. V lete sa používajú vrtule staviteľné za letu (uhol je menený pomocou mechanizmu zásahom pilota alebo automaticky) a staviteľné na zemi (uhol je menený manuálne pri odstavenom motore). Vrtule staviteľné z letu môžu byť staviteľné mechanicky, elektricky alebo hydraulicky. Mechanicky staviteľné vrtule používajú na prestavenie listov mechanický náhon napr. od kľuky v kabíne. Elektricky staviteľné vrtule prestavujú listy vrtule pomocou elektromotoru a prevodov. Najčastejšie sa využíva hydraulicky staviteľných vrtulí, ktoré sú nutné najmä pri pohonných jednotkách o vysokých výkonoch. Využívajú čerpadla hnaného motorom a hydraulického servomotoru. Automaticky staviteľné vrtule sa tiež nazývajú vrtule so stálymi otáčkami. Regulačný mechanizmus týchto vrtulí vo všetkých režimoch udržiava najvýhodnejší uhol nastavenia, sú preto najúčinnnejšie v celom rozsahu rýchlostí [6].



Obr. č. 7-2: Staviteľná vrtuľa pri rôznych letových režimoch [47] (upravené)

S rastúci počtom listov vrtule, klesá jej účinnosť. Je to spôsobené menšou vzdialenosťou medzi listami vrtule, kde prúdenie okolo jednotlivých listov je ovplyvnené prúdením okolo profilu predchádzajúcich listov. Jednolistá vrtuľa s protizávažím má preto najvyššiu účinnosť vrtule, v praxi je však potrebné zvážiť účinnosť celého pohonu a tiež účel pre ktorý je navrhnutý. [4] V modelárskych kruhoch platí pri výbere vrtule, že dvojlistá vrtuľa o priemere D je ekvivalentná trojlistej o priemere $0,9D - 0,92D$, resp. štvorlistej o priemere $0,84D - 0,87D$ [1]. Pri znalosti potrebného výkonu pri požadovanej letovej fáze je tiež možné vypočítať potrebný približný priemer vrtule zo vzorca (7.6) [1]:

$$D = K_P \cdot \sqrt[4]{P_{kW}} \quad (7.6)$$

kde: $P_{kW} = P \cdot \eta \quad (7.7)$

$$P_{kW} = 1 \cdot 0,94 = 0,94$$

z čoho vyplýva: $D = 0,56 \cdot \sqrt[4]{0,94} = 0,551 \quad [\text{m}]$

- kde: D – priemer vrtule [m]
 K_P – koeficient počtu listov vrtule (0,56 pre dvojlisté, 0,52 pre trojlisté, 0,49 pre štvorlisté vrtule) [-]
 P_{kW} – výkon [kW]
 P – príkon [kW]
 η – ideálna účinnosť motora [-]

Pri výpočte podľa vzorcov (7.6) a (7.7) vyšiel pri príkone obmedzenom na 1000 W a účinnosti motora AXI 5325/20, ako ideálny pre pohon modelu na ročník 2022, priemer približne 551 milimetrov resp. 21,71 palca. Pri výpočtoch a následnom meraní ťahu preto boli brané do úvahy vrtule o priemeroch 19 až 24 palcov rôznych stúpaní. V ročníku 2020 bola podľa výpočtov zvolená vrtuľa APC 20x8 E o priemere 20 palcov a stúpaní 8 palcov. Táto vrtuľa bola bezpečnou voľbou podľa výpočtov, z dôvodu nedostatku skúseností s limiterom.

Vzhľadom na neskoré dodanie limiteru (až v čase po dátume poslania záverečnej správy), nebolo možné otestovať chovanie limiteru. Po informáciách z rôznych zdrojov, ktoré často ukazovali na nepredvídateľné správanie starších typov limiterov po dosiahnutí limitného príkonu (napr. pulzovanie motora, niekoľko sekundové obmedzenie motora, dokonca vysadenie celého motora), bolo v tíme Chicken Wings rozhodnuté o zvolení vrtule menšieho priemeru ako vypočítaného (teda s nižším odberom príkonu) a úpravách postupov ohľadom pohonu (pomalší nábeh plného plynu). Pri meraní bolo preto zisťované najmä správanie limiteru s vrtulami o väčšom priemere resp. stúpaní a overovaná možnosť použitia vrtule väčšieho priemeru. Cieľom bolo v ročníku 2022 využiť vrtuľu o väčšom priemere a väčšom ťahu ako v ročníku 2020.

Pri porovnaní vrtúľ jednej rodiny je možné predpokladať veľkosť zmeny výkonov. Toto je možné aplikovať len pri rovnakej rodine vrtúľ. Vrtuľa rovnakého priemeru, rovnakého stúpania a od rovnakého výrobcu ale inej rodiny (E, SF, H, MC a iné), bude podávať pri rovnakých otáčkach odlišné výkony [8].

7.2. Aerodynamické vlastnosti

Pre správny návrh modelu je nutné poznať výkony pohonu. Pre ich výpočet je potrebné poznať ťah vrtule T , výkon motoru P_m , rýchlostný pomer J , prípadne krútiaci moment vrtule M_k , a účinnosť η . Pre najlepšie nadimenzovanie pohonu je možné vypočítať tiež využiteľný výkon motoru P_v a využiteľný ťah pohonnej jednotky F_v [7].

V ročníku 2020 bola výpočtová cestovná rýchlosť lietadla 18,5 m/s [25]. Pri výpočtoch pre lietadlo na ročník 2022 bolo ďalej počítané s rovnakou rýchlosťou. Využiteľný príkon motora je obmedzený limiterom na 1000 W, účinnosť motora je v rozsahu prúdov 15 – 65 A približne 94% [21]. Využiteľný výkon pohonnej sústavy je preto možno vyjadriť zo súčinu využiteľného ťahu a rýchlosti letu vzorcom (7.8) [7]:

$$P_v = T_v \cdot v \quad (7.8)$$

z čoho
vyplýva:

$$T_v = \frac{P_v}{v} = \frac{1000 \cdot 0,94}{18,5} = 50,81$$

kde: P_v – využiteľný výkon motora [W]
 T_v – využiteľný ťah [N]
 v – letová rýchlosť lietadla [m/s]

Využitelný ťah pohonnej jednotky je možné s pomocou znalosti účinnosti vrtule η , letovej rýchlosti v a potrebného výkonu motor P_m vypočítať zo vzorca (7.9) [7]:

$$T_v = \frac{\eta \cdot P_m}{v} \quad (7.9)$$

kde: T_v – využitelný ťah [N]
 v – letová rýchlosť lietadla [m/s]
 η – účinnosť vrtule [-]
 P_m – potrebný výkon motora [W]

Ťah vrtule je aerodynamická sila, ktorú možno vypočítať zo vzorca (7.10) [7]:

$$T = c_T \cdot \rho \cdot \frac{n^2}{60} \cdot D^4 \quad (7.10)$$

kde: T – ťah [N]
 c_T – koeficient ťahu [-]
 ρ – hustota vzduchu [kg/m³] (pozn. 1,205 kg/m³ pre 20°C)
 n – otáčky motora za minútu [ot/min]
 D – priemer vrtule [m]

Pri dimenzovaní pohonu možno uvažovať pri počiatkových výpočtoch o konštantnom napätí. Pri zväčšovaní priemeru vrtule, motor potrebuje pre jej roztočenie do rovnakých otáčok väčší príkon. Preto pri rovnakom počte článkov batérie (teda rovnakom napätí) bude pri rastúcom potrebnom výkone narastať prúd. Každý motor má istý rozsah prúdu pri ktorom poskytuje maximálnu účinnosť a tiež aj maximálnu hodnotu prúdu, pri ktorej je obvyčajne uvedená doba po ktorú je bezpečné používať motor s touto hodnotou prúdu. Pri príliš nízkom zaťažení (napr. vrtuľa o príliš malom priemere), motor nedosiahne dostatočné hodnoty prúdu, čo v praxi bude znamenať príliš nízke otáčky a nedostatočný ťah. Naopak pri vysokom zaťažení (napr. vrtuľa o príliš veľkom priemere), hodnoty prúdu presiahnu hodnotu prúdu pri optimálnej účinnosti, následkom čoho sa elektrická energia mení hlavne na teplo – motor sa prehrieva. V extrémnych prípadoch (prekročenie maximálneho dovoleného prúdu) môže dôjsť k poškodeniu motora [8].

Potrebný výkon možno vypočítať zo vzorca (7.11) [7]:

$$P_m = c_P \cdot \rho \cdot \frac{n^3}{60} \cdot D^5 \quad (7.11)$$

kde: P_m – výkon motora [W]
 c_P – koeficient výkonu [-]
 ρ – hustota vzduchu [kg/m³] (pozn. 1,205 kg/m³ pre 20°C)
 n – otáčky motora za minútu [ot/min]
 D – priemer vrtule [m]

Pre výpočty pri návrhu lietadla je najmä pri vrtuliach o veľkom priemere nutné poznať krútiaci moment vrtule. Ten je možné vypočítať zo vzorca (7.12) [4]:

$$M_k = c_M \cdot \rho \cdot \frac{n^2}{60} \cdot D^5 \quad (7.12)$$

kde: M_k – krútiaci moment [Nm]
 c_M – koeficient momentu [-]
 ρ – hustota vzduchu [kg/m³] (pozn. 1,205 kg/m³ pre 20°C)
 n – otáčky motora za minútu [ot/min]
 D – priemer vrtule [m]

Koeficienty c_T , c_P , c_M sú experimentálne zistenými hodnotami pri meraní v aerodynamickom tuneli. Pre rôzne otáčky vrtule a doprednú rýchlosť vrtule (resp. rýchlosť prúdu vzduchu, ktorým je ofukovaná vrtuľa) možno charakterizovať bezrozmerným parametrom nazývaným rýchlostný pomer, ktorý je možné vypočítať zo vzorca (7.13) [7]:

$$J = \frac{v_0}{\frac{n}{60} \cdot D} \quad (7.13)$$

kde: J – rýchlostný pomer [-]
 v_0 – rýchlosť prúdu vzduchu (príp. dopredná rýchlosť vrtule) [m/s]
 n – otáčky motora za minútu [ot/min]
 D – priemer vrtule [m]

Propulznú účinnosť vrtule možno po zistení rýchlostného pomeru, koeficientov ťahu a výkonu vypočítať zo vzorca (7.14) [7]:

$$\eta = \frac{c_T}{c_P} \cdot J \quad (7.14)$$

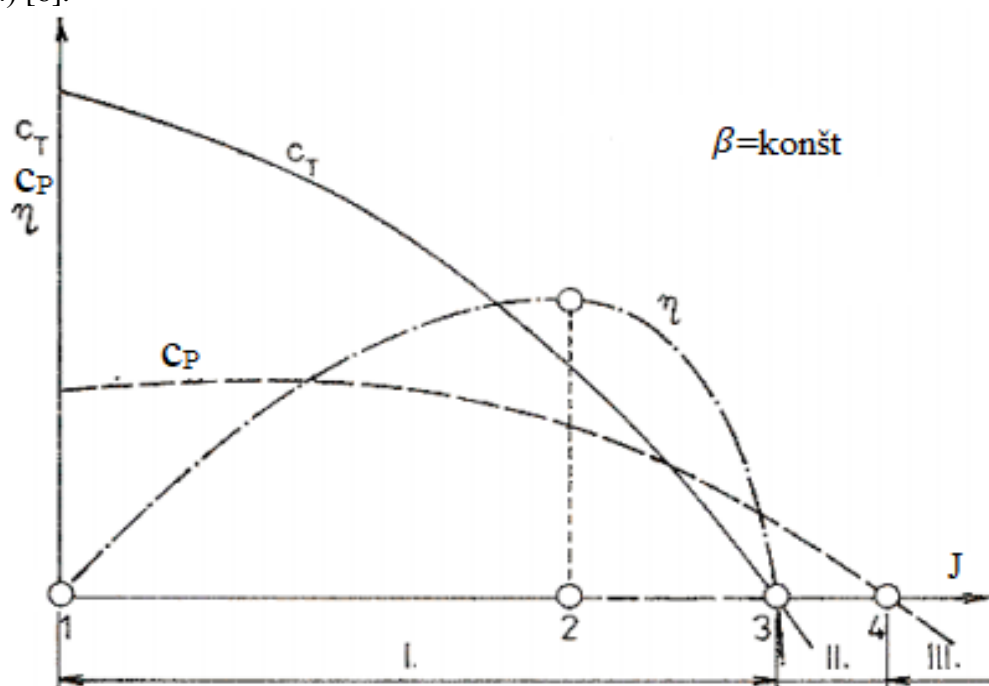
kde: η – účinnosť vrtule [-]
 J – rýchlostný pomer [-]
 c_P – koeficient výkonu [-]
 c_T – koeficient ťahu [-]

Pri práci vrtule s pevnými listami možno rozlišovať niekoľko základných pracovných režimov [6]. V Obr. č. 7-3 sú zobrazené niektoré pracovné režimy vrtule pri konštantnom uhle nastavenia listu vrtule. Pri postupe od nulovej hodnoty rýchlostného pomeru vrtule do vyšších hodnôt, rastie dopredná rýchlosť. Rastúci rýchlostný pomer zvyšuje uhol pritekajúceho prúdu a teda jednotlivé uhly nábehu rôznych elementov vrtuľového listu klesajú. V bode 1 pracuje vrtuľa pri nulovej doprednej rýchlosti v tzv. vrtuľníkovom režime. Listy vrtule sú ofukované pod vysokým uhlom nábehu, vytvárajú vysoký ťah za súčasnej potreby vysokého výkonu motoru. Vzhľadom na to, že vrtuľa nekoná dopredný pohyb tak sa účinnosť rovná nule a zároveň môže dochádzať k odtrhávaniu prúdenia na listoch s veľkým stúpaním [3].

V oblasti I pracuje vrtuľa v tzv. vrtuľovom režime. V tomto režime sa vrtuľa pohybuje dopredným pohybom. Jej účinnosť najprv rastie až kým dosiahne bod 2, čo je bod najvyššej účinnosti. Pre čo najlepšie využitie výkonu motoru je potrebné vrtuľu navrhnuť pre prácu v oblasti najvyššej účinnosti. Po prekonaní tohto bodu vrtuľa účinnosť stráca. Počas zvyšovania doprednej rýchlosti klesá uhol nábehu vrtuľového listu až do bodu 3 kde dosahuje bod tzv. nulového ťahu. V tomto bode vrtuľa neprodukuje už ťah pre zvýšenie doprednej rýchlosti, dosahuje znovu nulovej účinnosti ale spotrebúva výkon motora potrebný pre prekonanie aerodynamických odporov profilov listov [3].

V oblasti II pracuje vrtuľa v tzv. brzdiacom režime, kde produkuje záporný ťah a zároveň spotrebúva čoraz menej výkonu motora. V prípade keď tento výkon poklesne na nulu, vrtuľa pracuje v režime tzv. autorotácie (bod 4) [3]. Vrtuľa v režime autorotácie brzdí, otáča sa iba pôsobením aerodynamických síl. Tento režim využívajú napríklad rotory vírnikov [6].

Pri ďalšom zvyšovaní rýchlostného pomeru dochádza v oblasti III k režimu tzv. mlynčeka, kde vrtuľa síce brzdí ale zároveň je schopná fungovať v režime agregátu dodávajúceho energiu do sústavy (výroba elektrickej energie, štart motoru tzv. za chodu, atď.) [6].



Obr. č. 7-3: Režimy práce vrtule [48] (upravené)

7.3. Electric duct fan

Špeciálnym typom vrtuľového modelárskeho pohonu je EDF dúchadlo. EDF dúchadlo je usporiadanie elektromotoru a lopatkového dúchadla resp. viaclistej vrtule, v opláštení tejto jednotky. Toto opláštenie znižuje straty ťahu vznikajúce na koncoch listov vrtule. Tento pohon pracuje pri vyšších otáčkach (vyššie číslo KV ako

elektromotory pre vrtuľové pohony). Vďaka vyšším otáčkam dosahujú EDF dúchadlá rovnaký ťah ako vrtuľové pohony väčšieho priemeru. Tento typ pohonu je používaný najmä u modelárov, ktorí sa chcú vzhľadom modelu hodnoverne priblížiť reálnej predlohe modelu. S ohľadom na malé zástavbové rozmery oproti vrtuľovému pohonu a jednoduchosť použitia je využívaný ako simulácia prúdového motoru, resp. jednoduchšia náhrada RC prúdového motoru [9],[10].

Pri návrhu modelu je dôležité dbať na konfiguráciu sacieho a výfukového otvoru. Plocha sacieho otvoru by mala byť rovnaká, prípadne mierne menšia (cca 10 %) ako je plocha kružnice opisovanej lopatkami dúchadla. Pri menšom priereze sacieho otvoru, je potrebné dbať na pozvoľný prechod s neprekročením 4° (v reálnych aplikáciách až do 10° podľa niektorých zdrojov [1]) rozšírenia sacieho kanála v smere od vstupného prierezu ku lopatkám. Pri prekročení tohto uhla môže dôjsť k oddeleniu prúdu. Menší vstupný prierez zvýši optimálnu letovú rýchlosť, v ostatných fázach letu môže naopak účinnosť pohonu znižovať. Naopak, väčší prierez sacieho otvoru ako je priemer dúchadla spôsobí nižšiu účinnosť pohonu a preťaženie dúchadla – dúchadlom preteká väčší než optimálny objemový prietok vzduchu [9].



Obr. č. 7-4: EDF dúchadlo DS-68-AXI HDS (110mm) od výrobcu Schubeler jets [43]

Výstupný otvor by mal byť rovnakého prierezu ako je dúchadlo resp. ako prierez vstupu sacieho kanála. Pri veľmi rýchlych modeloch sa výstupný kanál zužuje rovnakým spôsobom v smere od dúchadla o 10 % - 20 %. Pri dlhých výstupných kanáloch je odporúčané nechať prierez za dúchadlom konštantný v čo najväčšej dĺžke a až následne prierez zmenšiť s použitím pravidla 4° [9].

Vo všeobecnosti platí, že rýchlejší, výkonnejší model s viac lopatkovým dúchadlom, potrebuje väčšie úpravy sacieho aj výstupného kanála spojené so zmenou prierezu. Všetky úpravy však tiež závisia od jednotlivých typov dúchadiel, ich spôsobu použitia v konkrétnom modeli a od požiadaviek na model kladených [9].

Dôležitým kritériom pri výbere dúchadla EDF, ktorý berie do úvahy aj rýchlosť prúdenia na konci výstupného kanála, je pomer výkonu k hmotnosti (7.15) [10]:

$$PWR = \frac{P_T}{m} ; \quad (7.15)$$

kde: PWR – pomer výkonu k hmotnosti (power-to-weight ratio) [W/kg]
 P_T – výstupný výkon [W]
 m – celková hmotnosť modelu [kg]

Výstupný výkon P_T je možné vypočítať, pri znalosti ťahu a výstupnej rýchlosti prúdenia vo výstupnom priereze podľa vzorca (7.16) [10]:

$$P_T = \frac{T \cdot v_e}{2} \cdot \eta ; \quad (7.16)$$

kde: T – ťah [N]
 v_e – rýchlosť vo výstupnom priereze [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]
 η – koeficient efektivity prúdenia v sacích/výstupných kanáloch [-]

Koeficient efektivity prúdenia v sacích/výstupných kanáloch závisí na vlastnostiach sacích/výstupných kanálov, pričom najvyšších (najlepších) hodnôt dosahuje pri krátkych oplášteniach veľkého priemeru. Jeho hodnoty, pri správne postavenom modeli, sa pohybujú v medziach 0,95 - 0,80, pričom v extrémnych prípadoch môžu tieto hodnoty klesnúť do 0,65. Tieto hodnoty sa však menia počas rôznych fáz letu vzhľadom na povahu prúdenia pri rôznych rýchlostiach, preto majú skôr informačný charakter [10].

7.4. Analýza vrtulí

Výpočty vrtulí boli založené na údajoch poskytovaných výrobcom. Pri priemere vrtule pri navrhovaní pohonu je možné riadiť sa odporúčaniami výrobcov motorov. Tí často uvádzajú pri motoroch doporučený priemer a stúpanie vrtulí, pri použití ktorých bude motor pracovať s najvyššou účinnosťou a pri najmenšom opotrebení. Potrebný priemer vrtule bol určený zo vzorca (7.6). Tento priemer bol braný ako základný priemer, pričom ďalšie výpočty prebiehali podľa údajov nameraných výrobcom. Do výpočtov boli zahrnuté vrtule o priemere 19, 20, 22 a 24 palcov a rôznych stúpaní. Výpočty boli prevedené pre vrtule značky APC, pretože výrobca APC na svojich oficiálnych webových stránkach disponuje verejne dostupnými súbormi nameraných hodnôt svojich vrtulí [31]. Následne boli niektoré tieto hodnoty pokusne zmerané, spolu s vrtulami iných výrobcov, ktoré do výpočtov v dôsledku nedostatku dát nemohli byť použité.

Základnou požiadavkou bol čo najvyšší ťah pri nízkych rýchlostiach, vyplývajúci z potreby krátkeho štartu. Pri výpočtoch bolo nutné zohľadniť obmedzenie príkonu na 1000 W, podobne ako pri výpočtoch pre ročník 2020. Vrtule boli porovnávané v troch otáčkových rozpätiach, kde sú podľa údajov výrobcu približne schopné dosiahnuť

žiadané hodnoty pre súťažné lietadlo. Otáčky vrtule boli pre počiatočné výpočty vypočítané zo vzorca (7.17) podľa tzv. KV čísla motora a napätia batérie 22,2 V kde:

$$RPM = KV \cdot U ; \quad (7.17)$$

pre motor AXI

$$5325/20 \quad RPM = 280 \cdot 22,2 = 6216 ; \quad [1/min]$$

KV = 280

pre motor

$$AXI4120/18 \quad RPM = 515 \cdot 22,2 = 11433 ; \quad [1/min]$$

KV = 515

kde: RPM – otáčky motora za minútu [ot/min]

U – napätie [V]

KV – otáčky na jeden volt [ot/V]

Z výpočtov zo vzorca (7.17) vyplynulo, že motor AXI 4120/18 má takmer dvojnásobné teoretické pracovné otáčky. Z údajov poskytovaných výrobcom vrtulí však bolo zrejmé, že motor pri týchto otáčkach bude potrebovať niekoľkonásobne vyšší príkon ako je príkon dovolený. Pri motore AXI 5325/20 sú otáčky mierne nad hranicou 6000 otáčok za minútu. Dovoľený príkon motora na úrovni 1000 W bol podľa údajov výrobcu vrtulí APC (v závislosti na konkrétnej vrtuli) dosiahnutý v rozmedzí 3000 až 6000 otáčok za minútu. Vzhľadom na to, že technické údaje poskytované výrobcom motorov sú parametre, pri ktorých motor poskytuje najväčšiu účinnosť a najlepšie výkony, bolo možné predpokladať lepšiu kompatibilitu vrtulí práve s motorom AXI 5325/20, čo bolo neskôr predmetom merania.

Pri výbere vrtulí bola jedným z rozhodujúcich faktorov tiež cena vrtule. Pre súťaž SAE 2020 bol tím Chicken Wings Brno vybavený štyrmi vrtulami a tím Chicken Wings Praha taktiež štyrmi. Tieto náhradné vrtule sú na súťaži potrebné z dôvodu možného poškodenia zachytením o zem pri štarte alebo pri pristátí alebo prípadnom poškodení pri opustení spevnenej dráhy. Pre testovanie bolo tiež nutné zabezpečiť niekoľko vrtulí o rôznych priemeroch a stúpaniach. Tieto vrtule nebolo možné pre meranie zapožičať, pretože vrtuľa musela byť upravená pre použitie na testovaných motoroch (prevrtanie náboja vrtule pre hriadeľ, resp. unášač motora – nemožnosť ďalšieho predaja).

Porovnanie jednotlivých údajov uvažovaných vrtulí je uvedené v Tab. č. 6. Všetky jednotlivé parametre vrtulí vypočítané z údajov výrobcov a vyjadrené graficky sa nachádzajú priložené v elektronickej prílohe A. V hlavnej časti práce ďalej boli uvedené len niektoré najdôležitejšie vypočítané hodnoty a závislosti.. Ostatné sú uvedené spolu s výpočtami a dátami výrobcu v elektronickej prílohe A.

Tab. č. 6: Porovnanie parametrov vybraných vrtulí [32],[33],[34],[35],[36],[37]

Vrtuľa	Priemer	Stúpanie	Hmotnosť	Cena
Jednotky	[mm ; in]	[mm ; in]	[g ; lbs]	[Kč]
APC 19x8E	483 ; 19	203 ; 8	83 ; 0,183	429
APC 20x8E	508 ; 20	203 ; 8	96 ; 0,212	499
APC 20x11E	508 ; 20	279 ; 11	113 ; 0,249	499
APC 22x10E	559 ; 22	254 ; 10	134 ; 0,295	669
Mejzlík 22x10CCW 2B EL	559 ; 22	254 ; 10	45 ; 0,100	2780
APC 24x12	610 ; 24	305 ; 12	164 ; 0,362	899

8. VÝPOČET PARAMETROV POHONU V ZÁVISLOSTI NA RÝCHLOSTI A OTÁČKACH

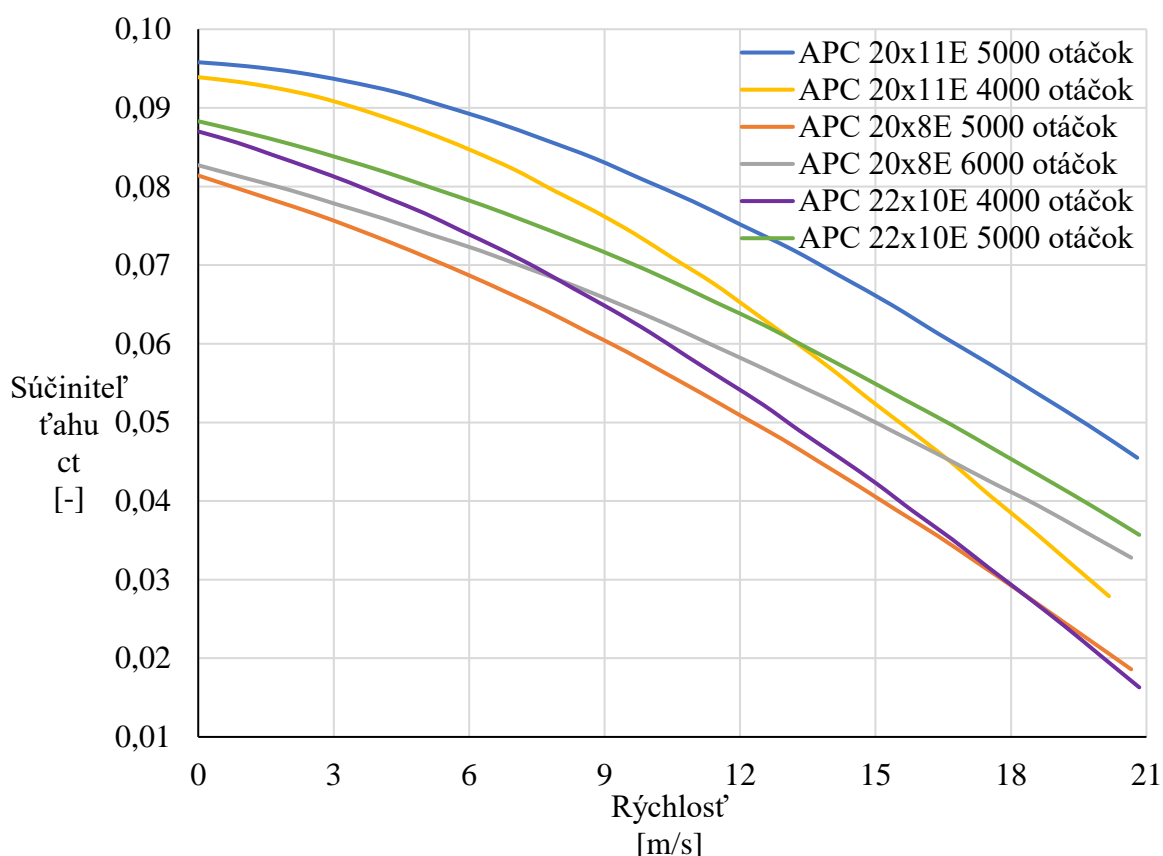
V kapitole 8 boli prevedené prepočty parametrov vrtule daných výrobcom z imperiálnych jednotiek na jednotky metrické. Následne boli zistené závislosti jednotlivých parametrov na rýchlosti. Tieto parametre boli na vybraných vrtuliach, neskôr odmerané na stande pre statický ťah a v aerodynamickom tuneli a spracované v ďalších kapitolách. Vo vzorcoch (7.10) a (7.11) je možné vidieť, že ťah sa zvyšuje s druhou mocninou otáčok a štvrtou mocninou priemeru vrtule a tiež, že potrebný výkon motora sa zvyšuje s tretou mocninou otáčok a piatou mocninou priemeru vrtule. Z toho vyplýva, že krivky závislostí výkonu na ťahu budú exponenciálne rásť, tj. každá vrtuľa časom dosiahne bodu v ktorom je ďalší nárast ťahu minimálny a sprevádzaný vysokým nárastom potrebného výkonu motora.

Pri modeli na súťaž SAE Aero Design je príkon motora umelo obmedzený limiterom na 1000 W, daná situácia preto nenastane. Podľa údajov výrobcu [31] boli vybrané vrtule s pravdepodobne najvyšším ťahom, pri čo najnižšom potrebnom výkone motora. Výrobca APC poskytuje na svojich oficiálnych webových stránkach [31], namerané údaje svojich vrtulí v rozmedziach po tisíckach otáčok. Pri prepočte z imperiálnej sústavy do metrickej, boli pri každej vrtuli vybrané 3 rozsahy otáčok, v ktorých vrtuľa potrebuje príkon motora do 1000W prípadne mierne nad túto hodnotu. Pre vrtule o priemere 19 a 20 palcov, resp. 483 a 508 milimetrov bol vybraný rozsah 4000 – 6000 otáčok a pre vrtule o priemere 22 a 24 palcov, resp. 559 a 610 milimetrov bol vybraný rozsah 3000 – 5000 otáčok. Pri súťaži bolo predpokladané použitie maximálneho možného výkonu, preto nebolo predpokladané funkčné použitie v rozmedzí nižších otáčok. Vyššie rady otáčok vyžadujú výkon motora, ktorý je výrazne vyšší ako výkon motora s príkonom 1000 W.

Pri zisťovaní závislostí boli brané do úvahy hodnoty namerané výrobcom pri rýchlostiach ofukovania od 0 m/s do 20 m/s, čo bola mierne nadhodnotená vypočítaná cestovná rýchlosť [25]. Pri náraste rýchlosti sa prejavuje pokles súčiniteľov ťahu a výkonu. Pri meraniach výrobcu, prevedených pri konštantných otáčkach, sú pri výpočte

ťahu a potrebného výkonu motora podľa vzorcov (7.10) a (7.11), jedinou premennou súčiniteľa ťahu a výkonu. Tieto bezrozmerné súčinitele s rastúcou letovou rýchlosťou klesajú, následkom čoho klesá aj potrebný výkon a generovaný ťah.

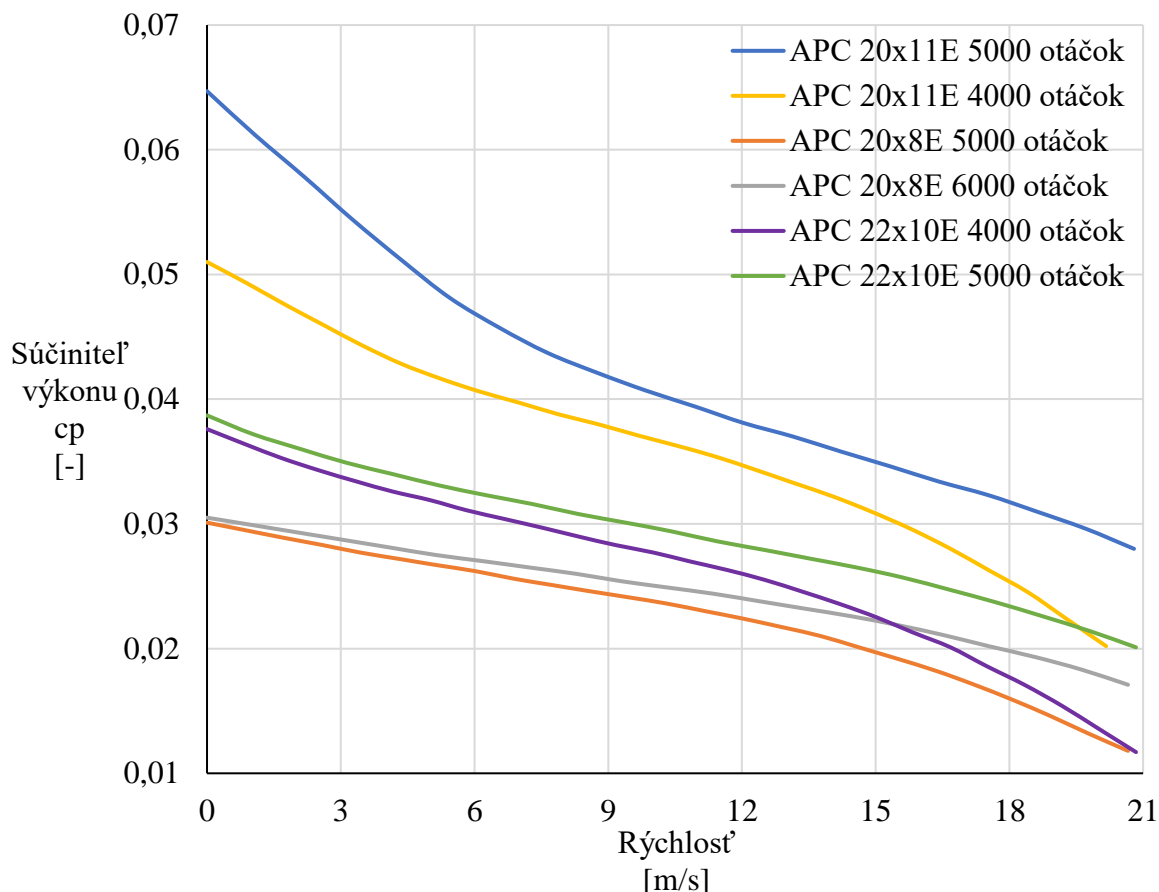
Platí, že pri vrtuli o rovnakom priemere ale rozdielnom stúpaní, je pri rovnakej rýchlosti hodnota oboch koeficientov vyššia pri vrtuli o väčšom stúpaní. Toto je možné pozorovať na Obr. č. 8-1 pre súčiniteľ ťahu a na Obr. č. 8-2 pre súčiniteľ výkonu. Priamo do práce boli vybrané obrázky troch najvyhovujúcejších vrtúl, ktoré boli neskôr aj merané na statický ťah a v aerodynamickom tuneli, ostatné vrtule použité vo výpočtoch sú dostupné v prílohe A. Pri týchto vrtuliach boli zobrazené dva rozsahy otáčok, kde podľa údajov výrobcu dosahujú hodnoty výkonu najbližšie hranice 1000 W.



Obr. č. 8-1: Závislosť súčiniteľa ťahu na rýchlosti pri najvhodnejších otáčkach vrtulí

Boli vybrané vrtule APC 20x8E, APC 20x11E a APC 22x10E. Vrtuľa APC 19x8E bola pri prepočtoch z údajov výrobcu a následnom vynesení závislostí, vyhodnotená ako nevhodná pre nedostatočný ťah. Vrtule APC 22x12E a APC 24x12E boli taktiež vyhodnotené ako nevhodné, pretože pri obmedzení príkonu motora na 1000 W, motor nedosiahol potrebné otáčky pre vytvorenie porovnateľného ťahu s vhodnými vrtuľami (resp. pre vytvorenie dostatočného ťahu potrebovali výrazne väčší výkon motora).

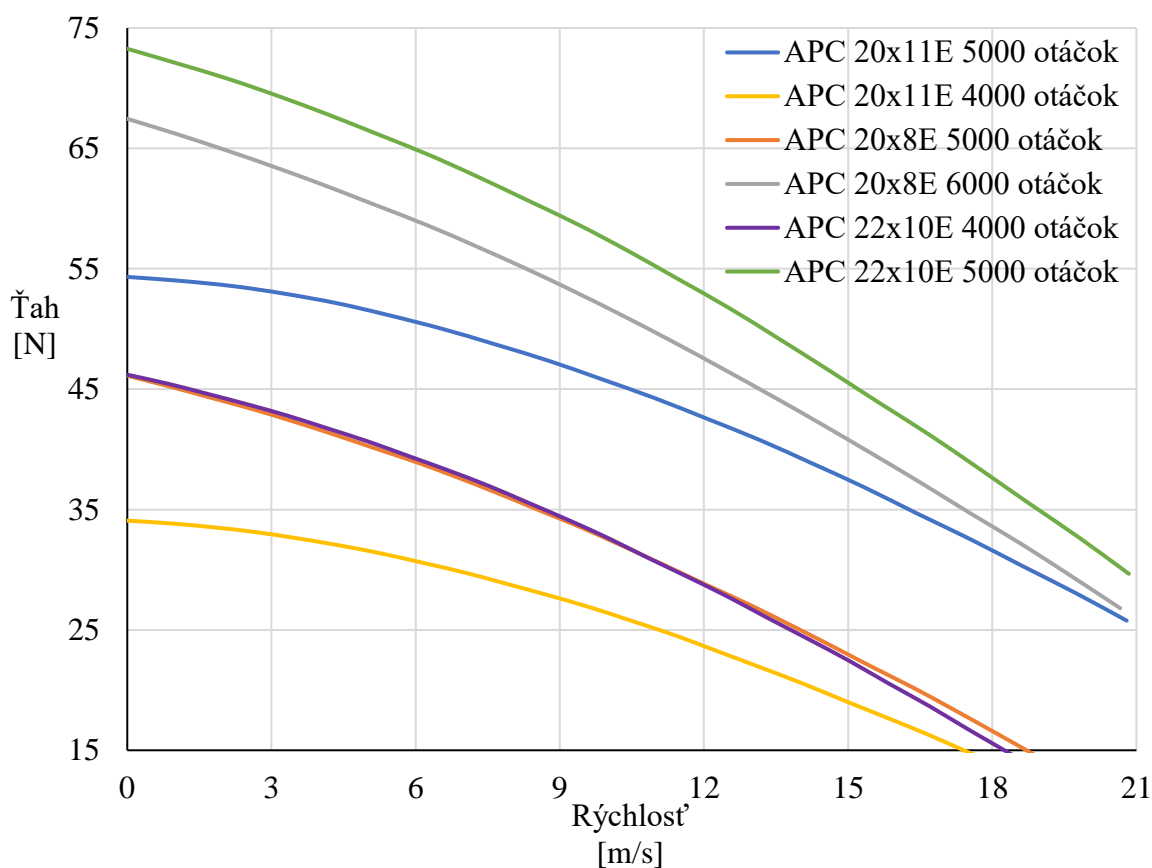
Na Obr. č. 8-1 je možné tiež pozorovať, že so zvyšujúcimi sa otáčkami sa smernica krivky znižuje a krivka sa posúva do vyšších rýchlostí (rovnakej hodnoty c_t bude dosiahnutej pri vyššej rýchlosti). Posun krivky možno tiež pozorovať pri súčiniteli výkonu c_p na Obr. č. 8-2. Pri súčiniteli výkonu je možné výraznejšie vidieť zvýšenie jeho hodnoty pri zväčšení priemeru a stúpania vrtule.



Obr. č. 8-2: Závislosť súčiniteľa výkonu na rýchlosti pri najvhodnejších otáčkach vrtulí

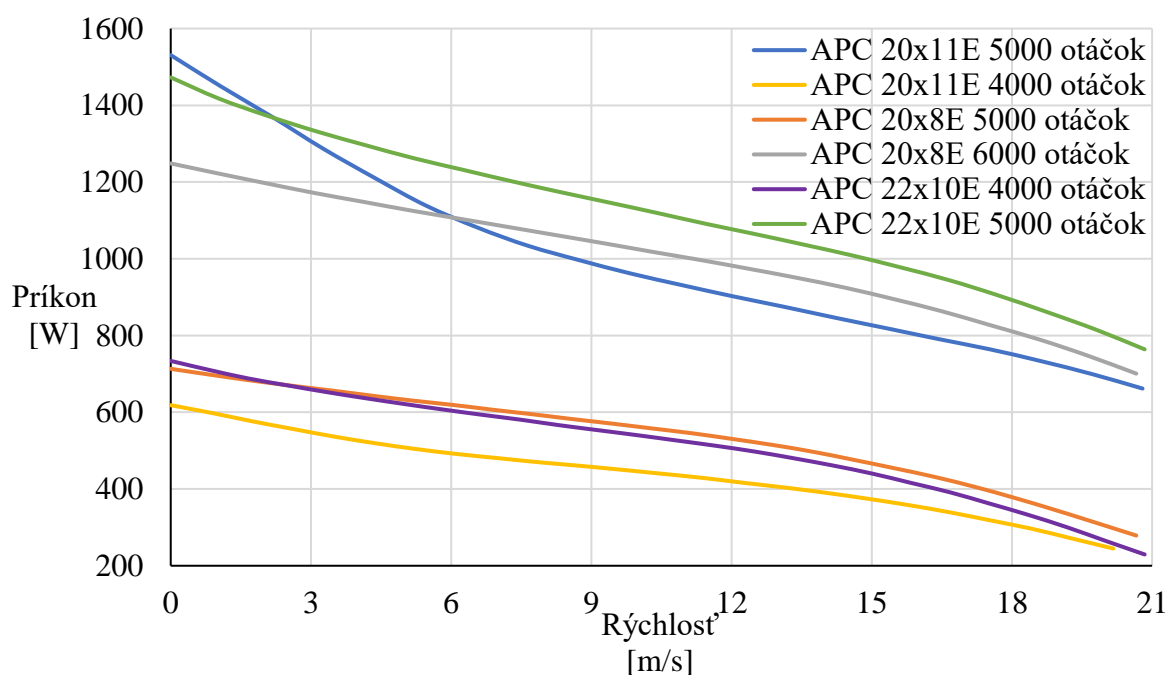
Ďalej boli pri rovnakých rýchlostiach zistené závislosti ťahu a príkonu na rýchlosti. Pri výpočtoch boli použité údaje výrobcu APC pre jednotlivé vrtule [31]. Pre každú vrtuľu boli vybrané dva rozsahy otáčok kde bol nutný výkon motora okolo hranice 1000 W. Z týchto údajov boli vytvorené závislosti, ktoré možno pozorovať na Obr. č. 8-3 a Obr. č. 8-4. Je možné pozorovať, že so stúpajúcou rýchlosťou ťah aj potrebný výkon motora klesá. Pri lete maximálnou rýchlosťou vo vodorovnom lete, vrtuľa môže dosiahnuť rýchlosti pri ktorej už nevytvára dostatočný ťah pre ďalšie zrýchlenie. V takom prípade by bolo možné ťah zvýšiť len ďalším zvyšovaním otáčok, ktoré je však podmienené extrémnym nárastom potrebného výkonu (tiež môže dôjsť ku deformáciám/kolapsu celej vrtule v prípade presiahnutia povolených prevádzkových hodnôt). Táto situácia v prípade modelu pre súťaž SAE Aero Design nenastane vzhľadom na povahu letovej misie [18].

Vzhľadom na letovú misiu bolo potrebné navrhnuť pohon s maximálnym statickým ťahom a maximálnym ťahom počas zrýchľovania na vzletovú rýchlosť (tj. po dobu kým je lietadlo na zemi a musí prekonať aj valivý odpor kolies podvozku). Z tohto dôvodu boli do výpočtov a meraní vybrané vrtule malého stúpania, ktoré pri nízkej rýchlosti (resp. nulovej rýchlosti), podľa výpočtov, poskytujú pri rovnakom potrebnom výkone motora vyšší ťah ako vrtule rovnakého priemeru s väčším stúpaním. Toto je možné vidieť pri porovnaní vrtulí o priemere 20 palcov ale rôznych stúpaniach na Obr. č. 8-3 a Obr. č. 8-4.. Následný rýchlejší pokles ťahu vrtúl malého stúpania pri vyšších letových rýchlostiach, nebol z dôvodu nízkej cestovnej rýchlosti braný v úvahu ako chybný.



Obr. č. 8-3: Závislosti ťahu na rýchlosti pre rozsah predpokladaných otáčok

Zistené závislosti zatiaľ potvrdzovali predošlý výber vrtule na ročník 2020 (APC 20x8E). Tento výsledok však vychádzal z úvahy, v ktorej je limiter schopný prepustiť maximálne 1000 W bez strát na motore. Vrtule APC 20x11E a APC 22x10E potrebovali pre vyšší ťah, výkon mierne presahujúci 1000 W. Pri tomto výkone bol predpoklad, že tieto vrtule by mohli dosahovať výhodnejších parametrov ako vrtuľa APC 20x8E. Preto v ďalších kapitolách bolo meraniami overované správanie celého pohonu s limiterom.



Obr. č. 8-4: Závislosti príkonu na rýchlosti pre rozsah predpokladaných otáčok

9. MERANIE PARAMETROV POHONU

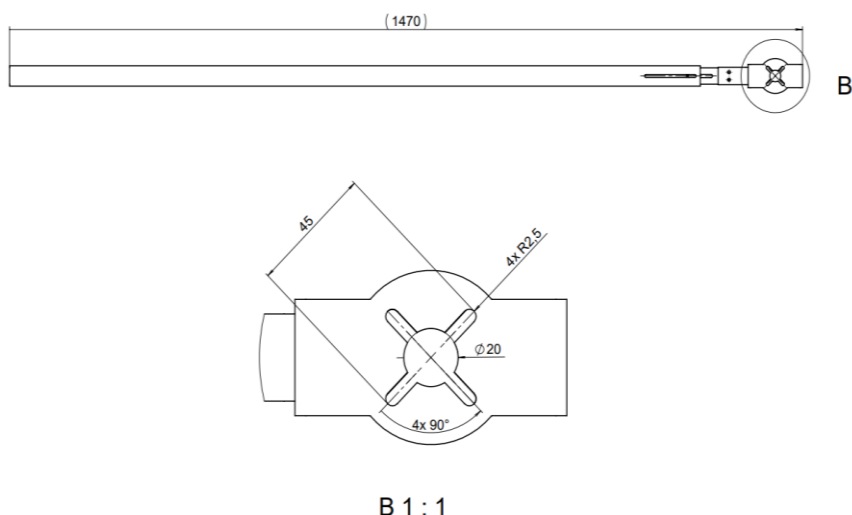
V tejto časti práce boli prevedené série meraní výkonnostných charakteristík pohonu. Merania boli prevedené v dvoch hlavných častiach: meraním statického ťahu pomocou VUT standu a meraním v aerodynamickom tuneli v spolupráci s členmi pražskej časti tímu Chicken Wings na ČVUT. Merania boli prevedené na rovnakom obvode ako bude použitý na súťaži SAE Aero Design. Jednotlivé súčiastky tohto obvodu je možné nájsť v Tab. č. 7. O napájanie bolo postarané pomocou 6 článkových batérií typu Li-Pol použitých v ročníku 2020. Na základe nameraných dát boli vyjadrené jednotlivé charakteristiky pohonu pre rôzne kombinácie motor – vrtuľa. Následne boli tieto charakteristiky vyhodnotené a z nich bola vybraná najvhodnejšia kombinácia.

Tab. č. 7: Súčiastky meraného obvodu

Súčiastka	Názov
Motor	AXI 5325/20
	AXI 4120/18
Regulátor	JETI Mezon Pro OPTO 55
Batéria	BigHobby Nano Tech 3500mAh 22.2V 60C (120C)
	GENS ACE 3700mAh 22.2V 60C
Prijímač	JETI Duplex REX 12 EPC
Limiter	NeuMotors SAE 2019 V2 limiter
Vrtuľa	APC 20x8E
	APC 20x11E
	APC 22x10E

9.1. Meranie statického ťahu

Meranie statického ťahu bolo prevedené pomocou VUT standu. Stand sa skladá z ramena, ktorým môže byť stand prichytený k pevnej základni (v prípade tejto bakalárskej práce poslužil ako základňa pracovný stôl na dielni tímu Chicken wings), a úchytu motoru. Rameno a úchyt motoru je spojený cez medzikus vybavený tenzometrami použitými pri meraní ťahu. Kabeláž pre motor môže byť vedená vnútri ramena alebo mimo ramena. Úchyt motoru je tvorený strednou kružnicou a štyrmi drážkami z nej vychádzajúcich, vzdialených o 90° . Tieto drážky umožňujú inštaláciu motorov rôznych priemerov. Náčrt VUT standu možno vidieť na Obr. č. 9-1. Pri meraniach bol využitý program DEWESoft X2 a všetky merané parametre boli zaznamenávané dataloggerom Dewetron Minitaur 101 s meracou kartou Dewe [38].



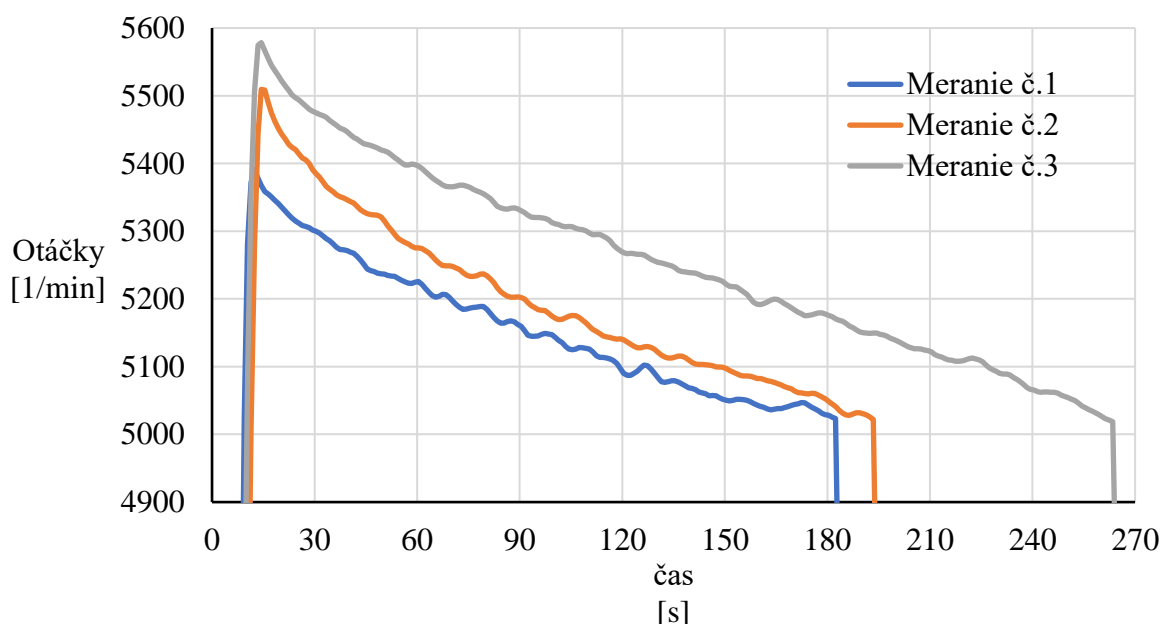
Obr. č. 9-1: Náčrt VUT standu

Pri prvom pokuse bol vyskúšaný chod motora AXI 4120/18 v súčinnosti s vrtuľou APC 20x8E zatiaľ bez merania ťahu. Po približne 60 sekundách chodu došlo k zastaveniu motora, pričom pri ďalšom pokuse sa zastavenie opakovalo. Pri ďalšom pokuse bol využitý vylepšený regulátor s väčším chladičom. V oboch prípadoch došlo k prehriatiu regulátora resp. motora, pričom regulátor oba razy prerušil chod ešte pred nevratným poškodením. Na základe tejto skúsenosti bol motor vyradený a ďalšie merania boli prevedené už len s motorom AXI 5325/20.

Pre každú vrtuľu boli prevedené 3 platné merania z dôvodu väčšej presnosti merania. Pre vrtuľu APC 22x10E bolo prevedené meranie pre obvod zapojený bez limiteru resp. meranie so zapojeným limiterom, zdrojom a bez batérie. Na týchto meraniach bola ukázaná nutnosť použitia batérie miesto zdroja a tiež rozdiel medzi výkonmi pohonu bez a so zapojením limiteru.

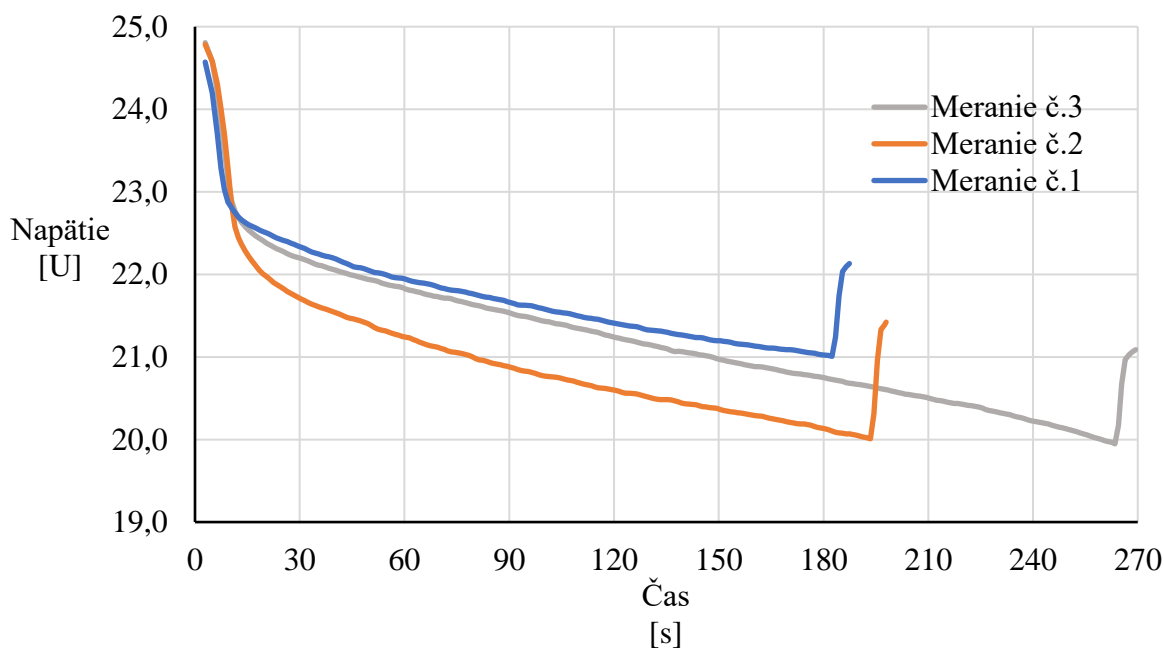
9.1.1. Vrtuľa APC 20x8E

Na Obr. č. 9-2 je možné vidieť rozdiel v dĺžke behu motora s vrtuľou APC 20x8E, pri batériách rovnakého typu BH NanoTech 3500mAh, ale aj rozdiel novej resp. málo používanej (meranie č.3) a intenzívne používanej batérie v lietadle na súťaži v ročníku 2020 (meranie č.2). Meranie č.1 bolo prevedené na tzv. záletovej batérii (použitej niekoľkokrát najmä pri záletoch), ktorá bola vybitá na 21 V namiesto na 20 V ako ostatné dve. Z porovnaní na Obr. č. 9-2 je možné usúdiť, že rozdiel medzi používanou batériou, ktorá bola vybíjaná hlbokocyklovo veľkými prúdmi a novou batériou je značný, v danom prípade bol rozdiel približne 25–30 % času. Pri vybití tzv. záletovej batérie na 20 V možno očakávať čas vybíjania podobný, príp. mierne nižší ako pri meraní č.3. Možno to usúdiť zo sklonu vybíjacej krivky tejto batérie na Obr. č. 9-2. Pri odľahčení pohonu na konci merania možno vidieť, že krivka aktuálneho napätia na batérii prudko narastie. Po opätovnom zaťažení by napätie batérie opäť kleslo na predošlú hodnotu. Je možné predpokladať, že pod hodnotou 20 V dôjde k čoraz strmšiemu poklesu krivky (k rýchlemu vybitiu).

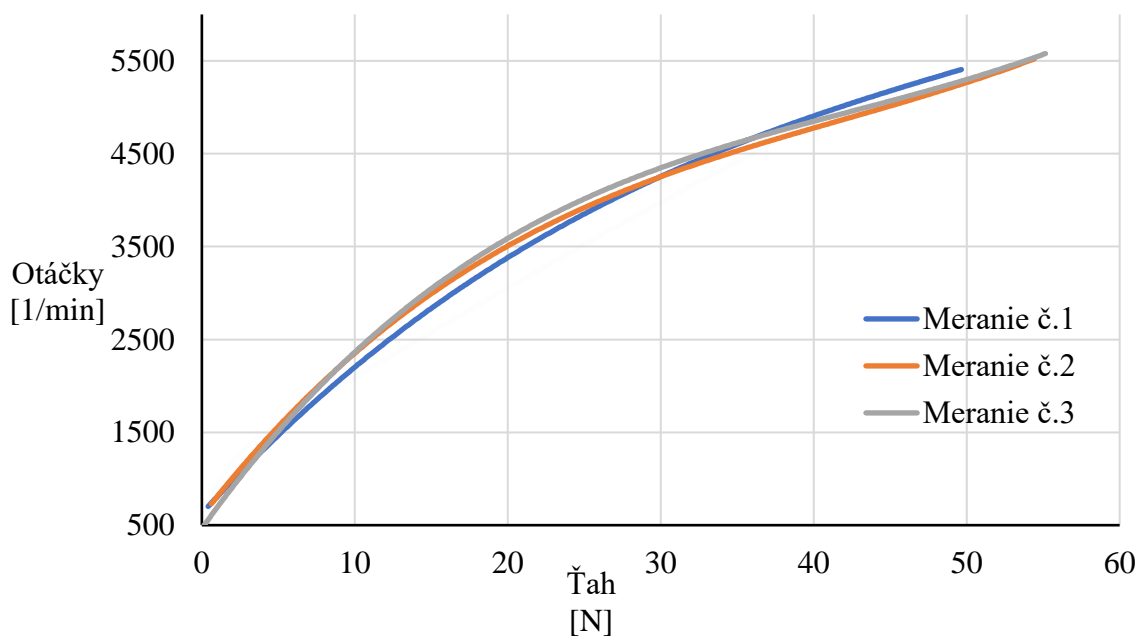


Obr. č. 9-2: Vrtuľa APC 20x8E – Závislosť otáčok na čase behu motora

Pracovné otáčky pri tejto pohonnej sústave sa pohybujú v rozmedzí približne 5000 až 5600 ot/min, čo je nižšia hodnota oproti vypočítaným otáčkam podľa KV čísla a vzorca (7.17). Tento rozdiel je spôsobený vrtuľou väčšieho priemeru ako je výrobcom doporučený priemer, napriek tomu je tento výsledok najbližšie k vypočítaným otáčkam zo všetkých troch vrtulí. Bolo možné predpokladať, že kapacita vypočítaná podľa vzorca (3.2) by bola nedostatočná, pretože batéria o približne 1000 mAh vyššej kapacity dosahuje dĺžku letu len približne o 60 sekúnd väčšiu. Z tohto dôvodu bola zvolená kapacita na úrovni približne 3500 mAh bezpečnou hodnotou, kde by v batérii ostalo ešte dosť energie pre opravný pokus pristátia.

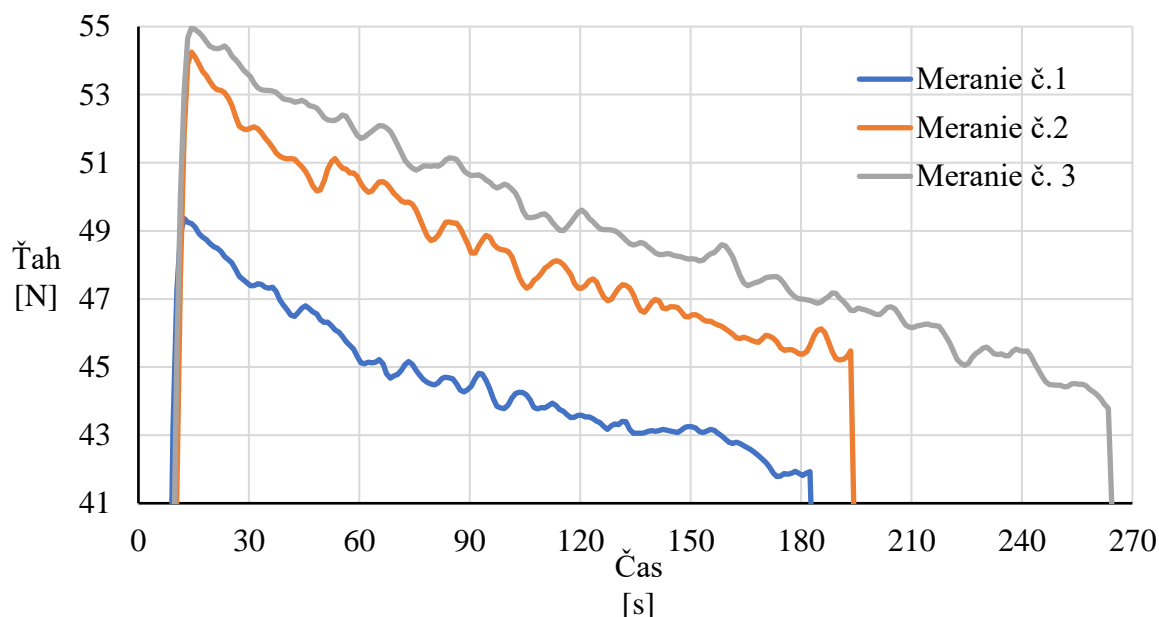


Obr. č. 9-3: Vrtuľa APC 20x8E - Závislosť napätia na čase

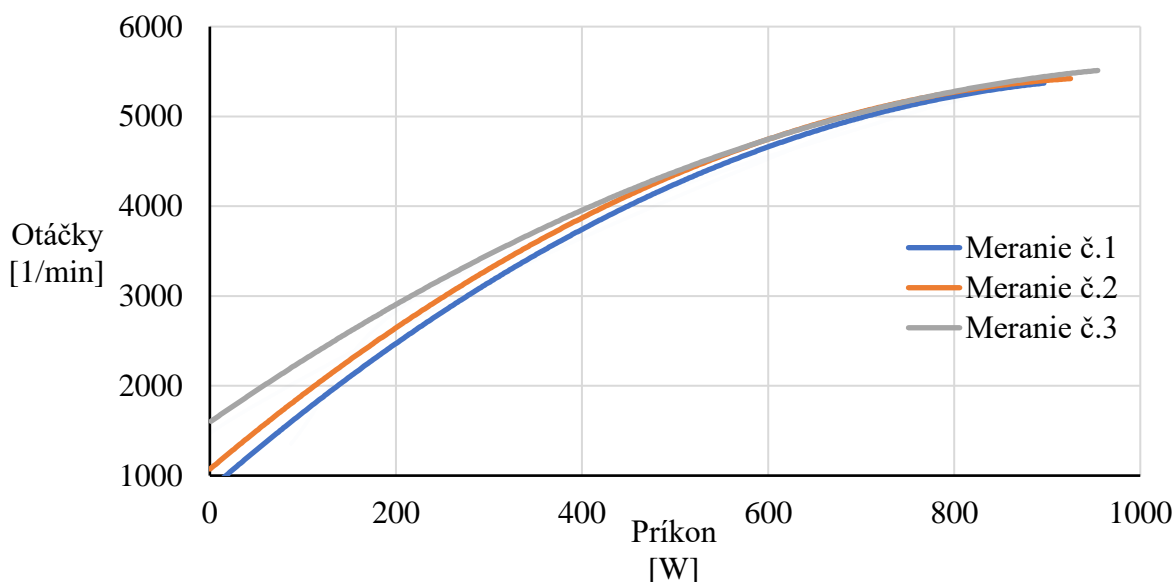


Obr. č. 9-4: Vrtuľa APC 20x8E – Závislosť ťahu od otáčok

Priamu závislosť ťahu od otáčok podľa vzorca (7.10) možno vidieť na Obr. č. 9-4. Maximálny ťah dosahovaný s vrtuľou APC 20x8E sa pohyboval v rozmedzí 50-55 N. Pre reálne použitie bolo však nutné počítať s postupným klesaním ťahu pri poklese otáčok počas vybíjacieho cyklu. Pokles ťahu v čase možno vidieť na Obr. č. 9-5. Pre súťažný let je dôležitý čo najvyšší ťah vo fáze rozbehu a vzletu, čo možno očakávať behom prvých približne 30 sekúnd letu. V tomto čase bol pokles ťahu nezávisle od batérie približne 2 N. Pri dĺžke letu približne 180 sekúnd bol pokles ťahu pri každom meraní približne 7-8 N.



Obr. č. 9-5: Vrtuľa APC 20x8E - Závislosť ťahu na čase behu motora



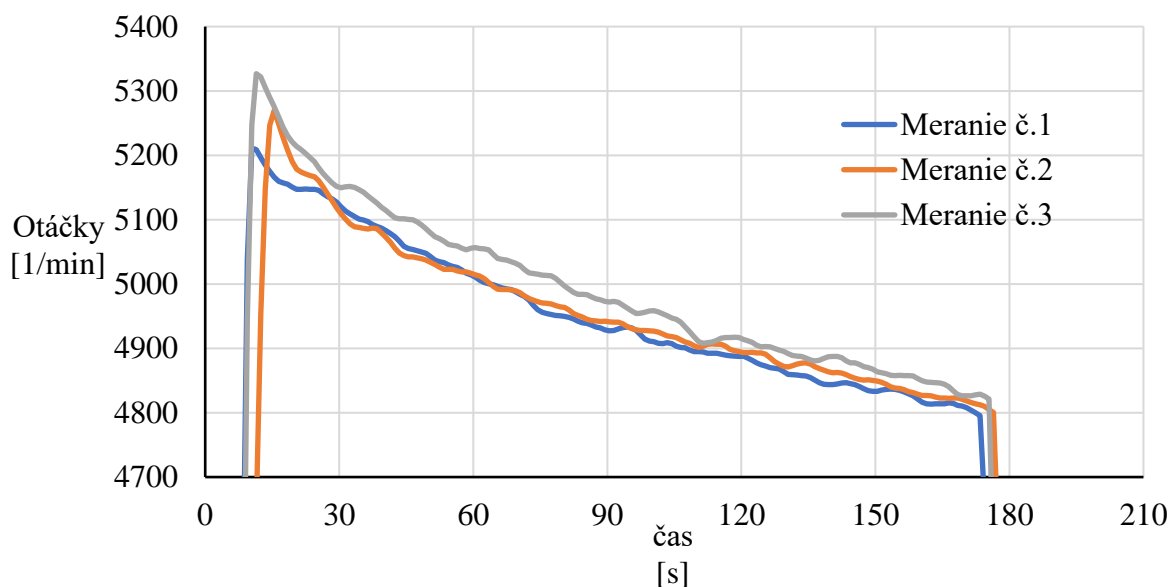
Obr. č. 9-6: Vrtuľa APC 20x8E – Závislosť príkonu od otáčok

Pri porovnaní príkonu a otáčok na Obr. č. 9-6, možno vidieť, že príkon pri maximálnych otáčkach nedosahuje hodnotu 1000 W pri ktorej by začal účinkovať limiter. Tento zvolený pohon možno považovať preto za absolútne bezpečný nezávisle od správania sa limiteru. Tvar kriviek odpovedá predpokladu, že vrtuľa po počiatočnom prudkom náraste otáčok, zvyšuje svoje otáčky len za čoraz väčšieho nárastu príkonu motora až do hodnoty kde by minimálne zvýšenie otáčok bolo sprevádzané obrovským nárastom potrebného výkonu motora (a príkonu v prípade elektromotora).

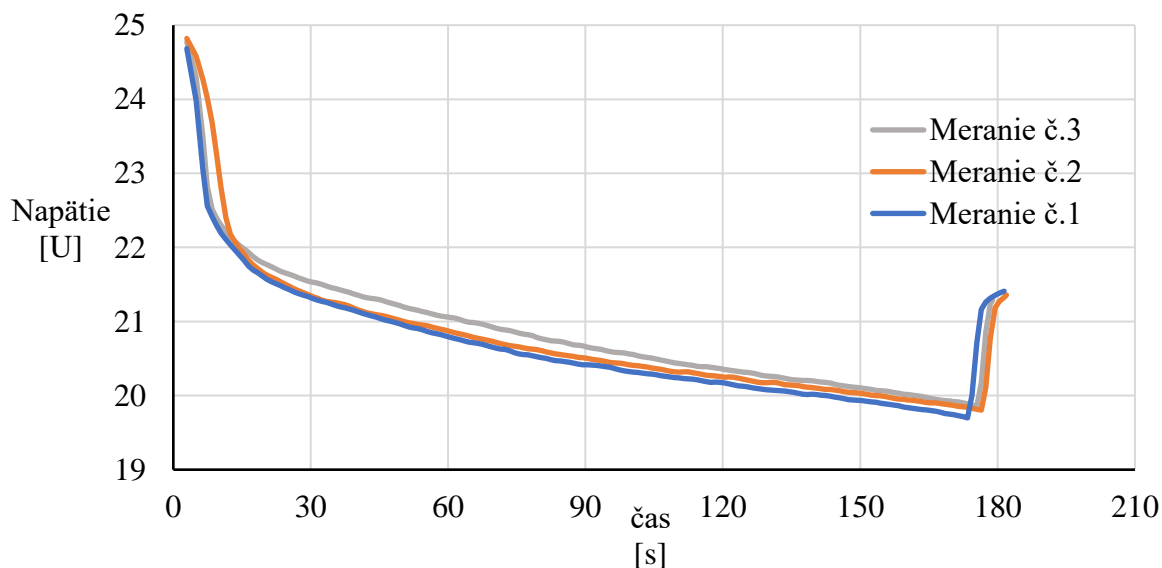
Namerané parametre, výpočty a niektoré ďalšie závislosti sú priložené v elektronickej prílohe B resp. C.

9.1.2. Vrtuľa APC 20x11E

Na Obr. č. 9-7 je možné vidieť merania otáčok v čase pre vrtuľu APC 20x11E. Merania boli prevedené pre používanú batériu BH NanoTech 3500 mAh. Ako možno vidieť na Obr. č. 9-7, všetky tri závislosti majú minimálne rozdiely. Rozptyl otáčok medzi meraniami sa pohyboval približne v rozsahu 100 ot/min v rozmedzí 5300 – 4800 otáčok. Dĺžka letu na plný plyn, pri poklese napätia na približne 20 V, bola vo všetkých troch prípadoch 170 - 180 sekúnd. Rozdiel medzi vybíjacími krivkami bol minimálny a kopíroval teoretickú krivku vybíjania Li-Pol batérií, čo je viditeľné z Obr. č. 9-8.



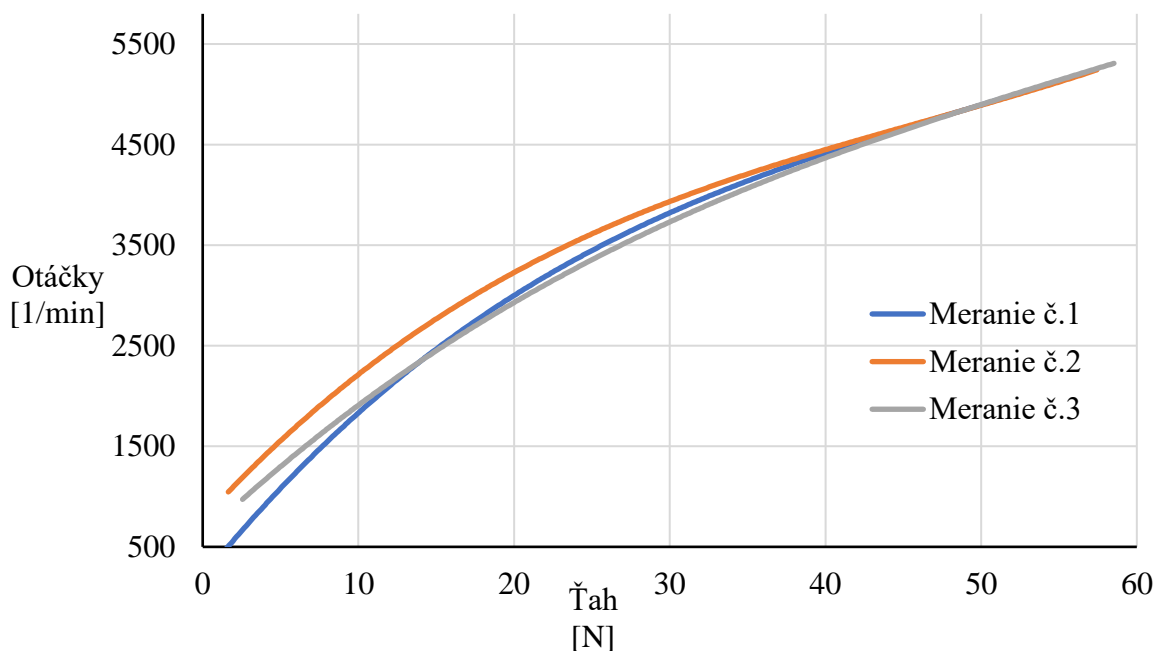
Obr. č. 9-7: Vrtuľa APC 20x11E – Závislosť otáčok na čase behu motora



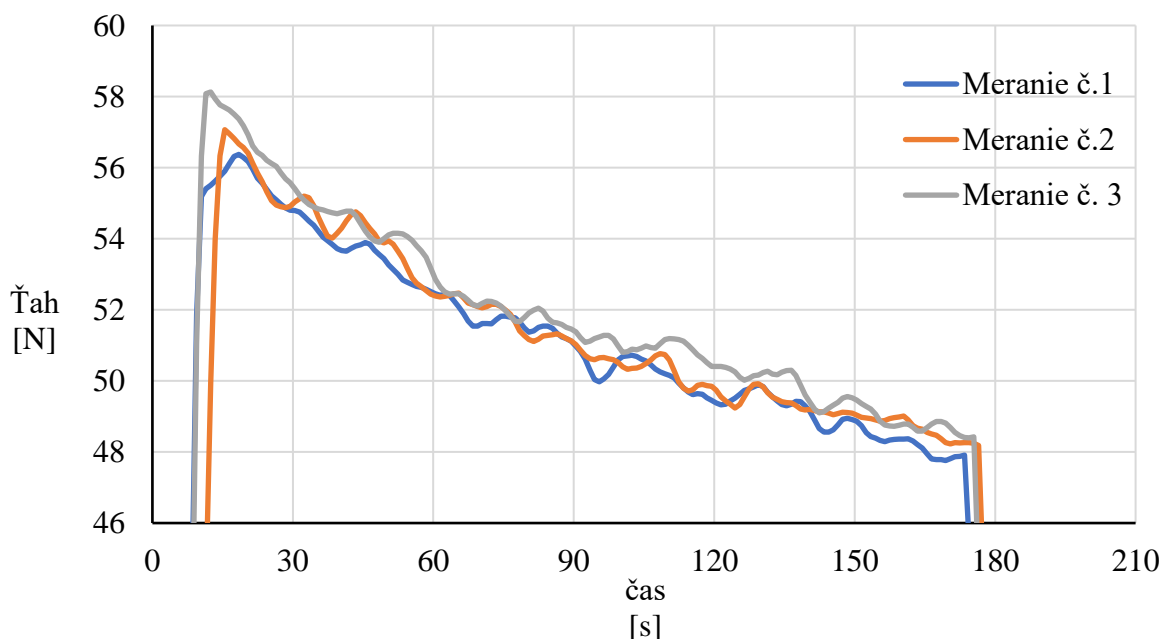
Obr. č. 9-8: Vrtuľa APC 20x11E - Závislosť napätia na čase behu motora

Priamu závislosť ťahu od otáčok podľa vzorca (7.10) možno vidieť na Obr. č. 9-9. Maximálny ťah dosahovaný s vrtuľou APC 20x11E sa pohyboval v malom rozptyle

hodnôt 56 - 59 N pri otáčkach 5200 – 5300 ot/min. Pokles ťahu v čase možno vidieť na Obr. č. 9-10. Behom prvých 30 sekúnd letu bol pokles ťahu približne 2 - 4 N. Pri dĺžke letu približne 180 sekúnd bol pokles ťahu pri každom meraní približne 8 - 10 N.

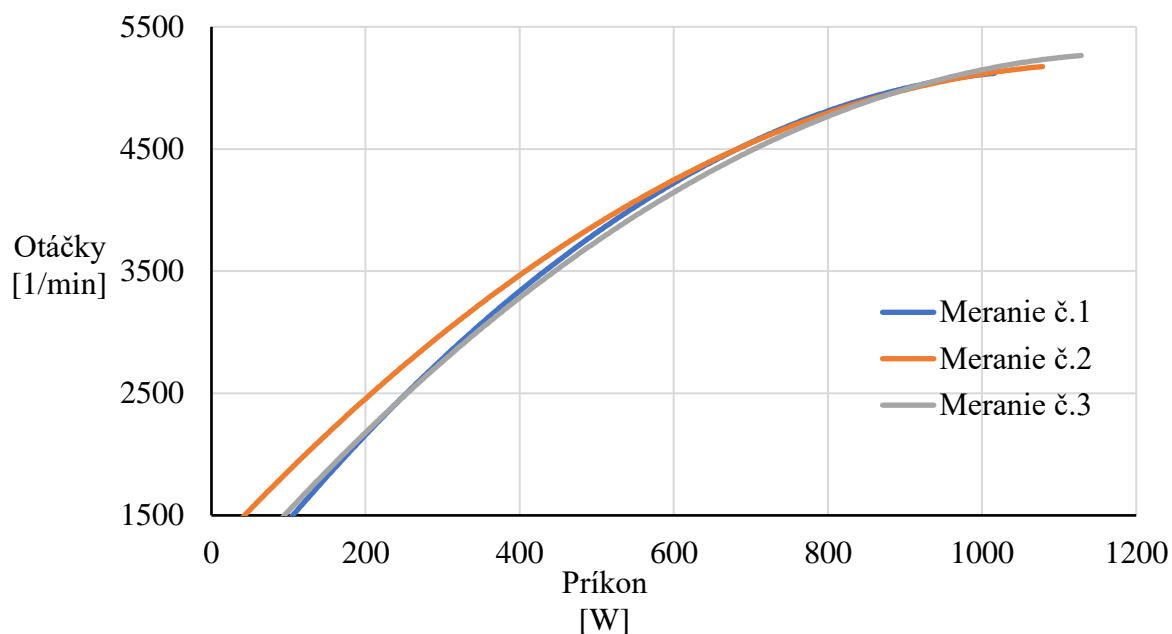


Obr. č. 9-9: Vrtuľa APC 20x11E – Závislosť ťahu od otáčok



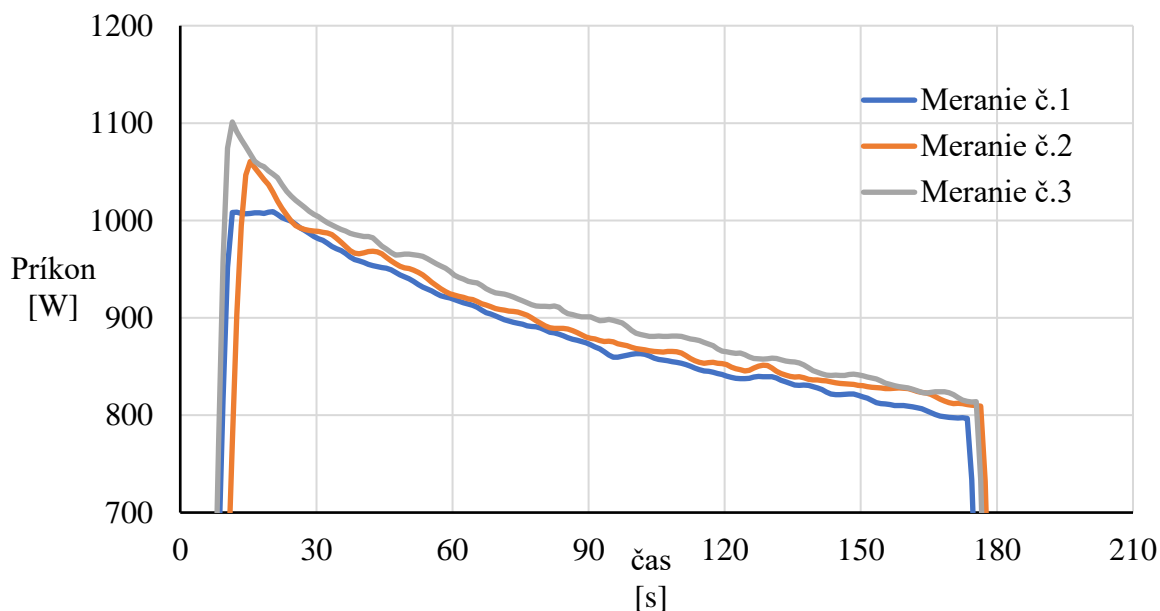
Obr. č. 9-10: Vrtuľa APC 20x11E - Závislosť ťahu na čase behu motora

Pri porovnaní príkonu a otáčok na Obr. č. 9-11, možno vidieť, že príkon pri maximálnych otáčkach presahuje hodnotu 1000 W, pri ktorej by mal začať účinkovať limiter, o približne 100 W. Tvar kriviek odpovedá predpokladu bližšie opísanému pri popise vrtule APC 20x8E.



Obr. č. 9-11: Vrtuľa APC 20x11E – Závislosť príkonu od otáčok

Z Obr. č. 9-12 je zrejmé, že pri meraniach č.2 a č.3 výkony neboli limiterom obmedzené, kdežto pri meraní č.1 je viditeľný konštantný príkon mierne nad 1000 W po dobu 14 sekúnd. Toto meranie sa v ničom neodlišovalo od meraní č.2 a č.3, rozdiel príkonu v meraniach nebol taký zásadný (približne 60 resp. 100 W) a nebol po dostatočne dlhú dobu, aby daná situácia mohla byť jasne prisúdená limiteru. Tento predpoklad bol braný v úvahu pre ďalšie meranie pre vrtuľu APC 22x10E

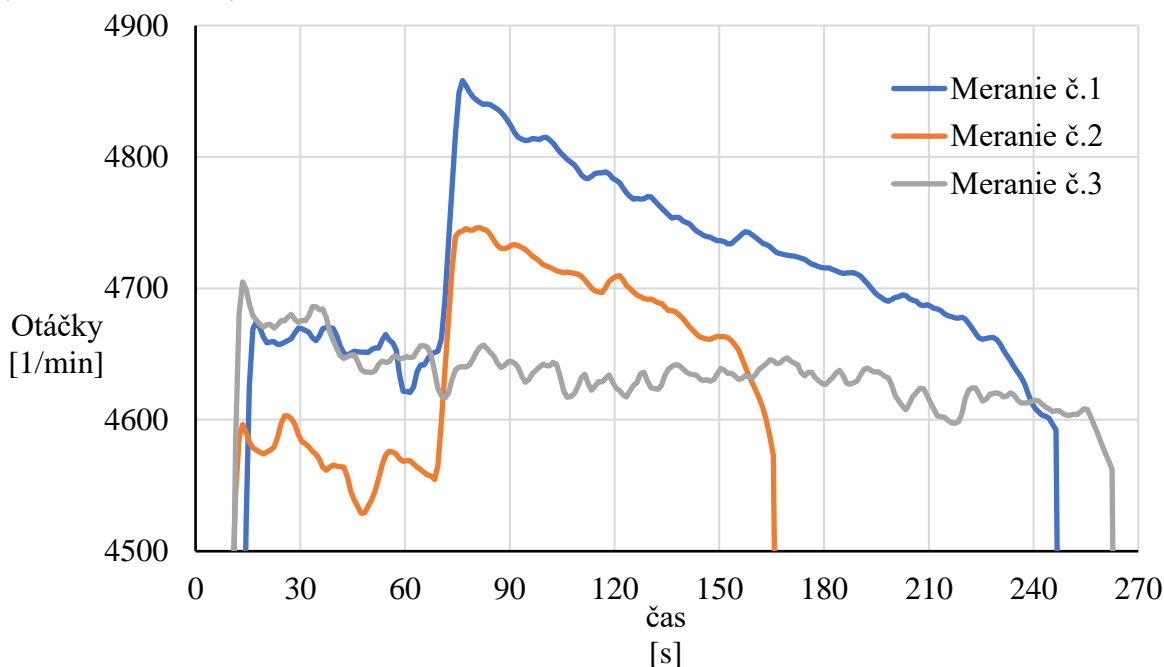


Obr. č. 9-12: Vrtuľa APC 20x11E - Závislosť príkonu na čase

Namerané parametre, výpočty a niektoré ďalšie závislosti sú priložené v elektronickej prílohe D resp. E.

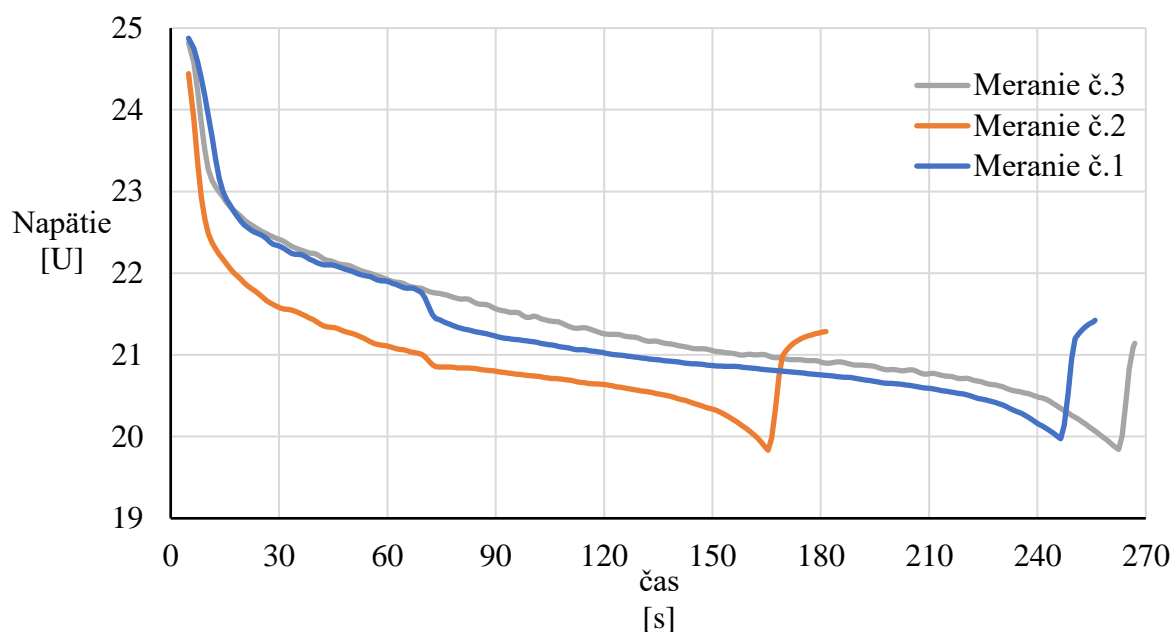
9.1.3. Vrtuľa APC 22x10E

Pre vrtuľu APC 22x10E boli prevedené dva druhy meraní. Prvá séria meraní bola prevedená rovnakým spôsobom ako pri ostatných vrtuliach, pričom bol sledovaný pokles hodnôt parametrov v čase pri plnom plyne. Pri tejto vrtuli sa ako u prvej výraznejšie prejavil vplyv limiteru. Na krivkách otáčok na Obr. č. 9-13 možno vidieť, že na počiatku limiter obmedzil príkon, čo sa prejavilo stálymi otáčkami v rozmedzí 4550 – 4700 ot/min. Pri dvoch z troch meraní po približne 70 sekundách behu, limiter začal prepúšťať príkon výrazne nad 1000 W, čo sa prejavilo skokovým nárastom všetkých meraných parametrov, napr. otáčky narástli v oboch meraniach približne o 200 ot/min. Limiter navonok stále vykazoval plnú funkčnosť podľa pravidiel (kontrolná LED dióda signalizovala funkčnosť), nejde teda o porušenie pravidiel. V prípade merania č.3 limiter udržiaval príkon konštantne takmer po celú dobu okolo hodnoty 1000 W, čo sa prejavilo takmer konštantnými otáčkami o hodnote 4700 – 4600 ot/min. Pri meraní č.2 možno vidieť časový rozdiel (približne 170 sekúnd) pri používanej batérii oproti málo používaným (240 - 260 sekúnd).



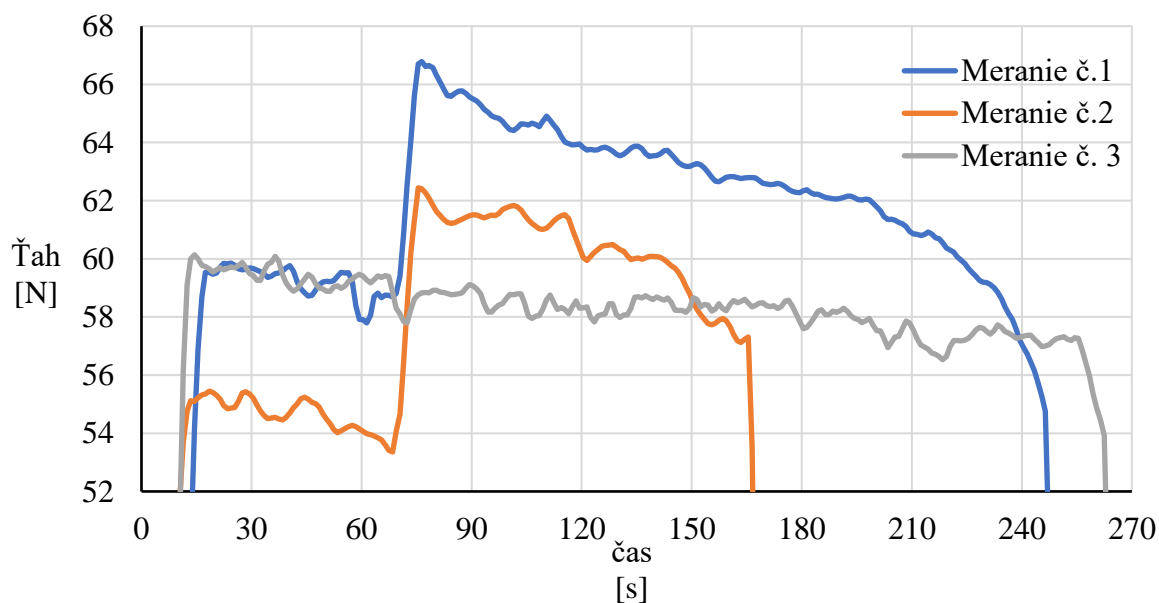
Obr. č. 9-13: Vrtuľa APC 22x10E – Závislosť otáčok na čase behu motora

Rovnakú skokovú zmenu možno vidieť pri napätí. Na Obr. č. 9-14 možno pozorovať výraznejšiu zmenu smernice vybijacej krivky v blízkosti konečnej hodnoty napätia 20 V. V danom prípade je zaťažená batéria už blízko stavu vybitia, kde napätie klesá výraznejšie. Je možné predpokladať, že v nasledujúcich sekundách ďalšieho behu motoru pod záťažou by došlo k zastaveniu motora ako ochrany pred podvybitím.



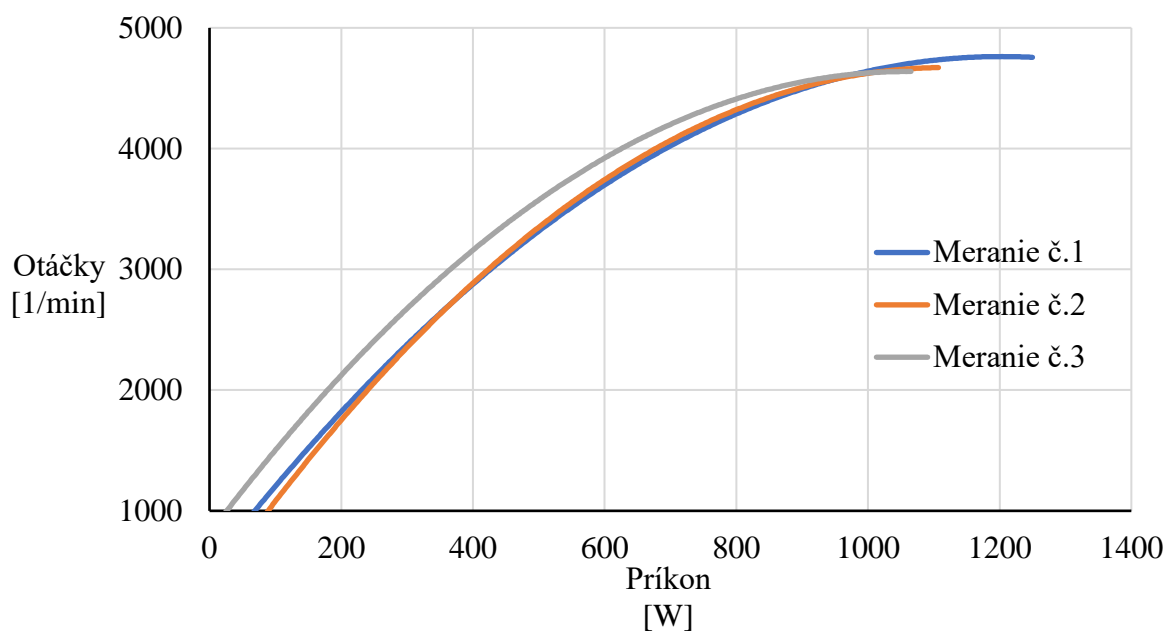
Obr. č. 9-14: Vrtuľa APC 22x10E - Závislosť napätia na čase behu motora

Maximálny ťah sa pohyboval v hodnotách 55 – 60 N pri fungovaní limiteru. Po približne 70 sekundách pri meraniach č.1 a č.2 limiter prestal plniť svoju funkciu a ťah skokovo vzrástol na 63 – 67 N čo možno sledovať na Obr. č. 9-15. Prvých 30 sekúnd bol dosiahnutý ťah 54 – 60 N. Pri meraní č.3 bol po celú dobu udržiavaný ťah o hodnotách 56 – 60 N.



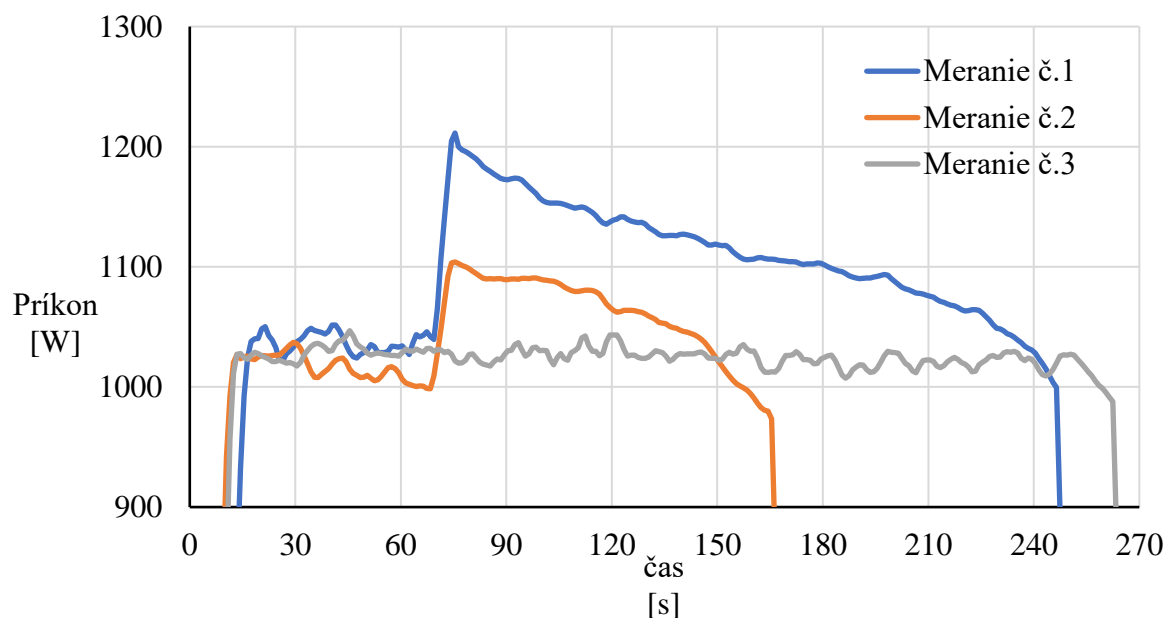
Obr. č. 9-15: Vrtuľa APC 22x10E - Závislosť ťahu na čase behu motora

Krivka príkonu v závislosti na otáčkach sa pri každom meraní podľa Obr. č. 9-16 nad hodnotou 1000 W vyrovnávala. Je možné predpokladať, že pri vyšších hodnotách príkonu by už otáčky stúpali len za veľkého prírastku príkonu motora.



Obr. č. 9-16: Vrtuľa APC 22x10E - Závislosť príkonu na otáčkach

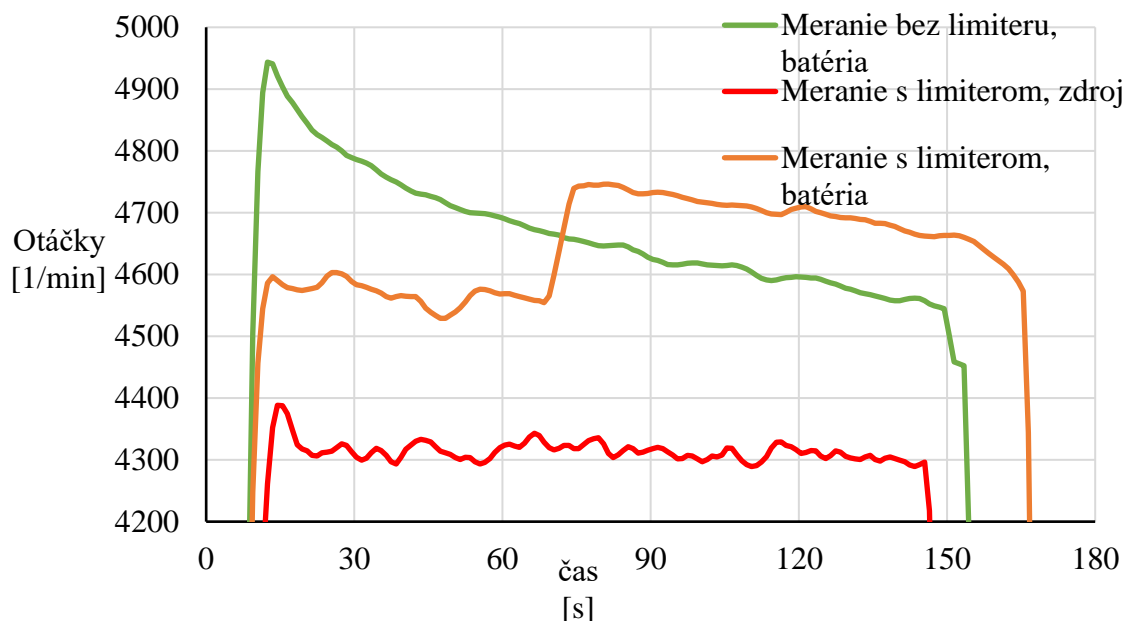
Príkon prepustený limiterom v čase je možné vidieť na Obr. č. 9-17. Tento príkon sa pohyboval na hodnotách do 1100 W. Po približne 70 sekundách pri meraniach č.1 a č.2 príkon motora skokovo vzrástol na 1100 resp. 1200 W, z čoho možno súdiť, že limiter prestal obmedzovať príkon, hoci navonok stále ukazoval funkčnosť, čo je dôležité z pohľadu pravidiel. Limiter, žiaľ v prvých 30 sekundách vždy vykazoval plnú činnosť, preto je možné rátať pri štarte s hodnotami ťahu pri príkone približne do 1100 W.



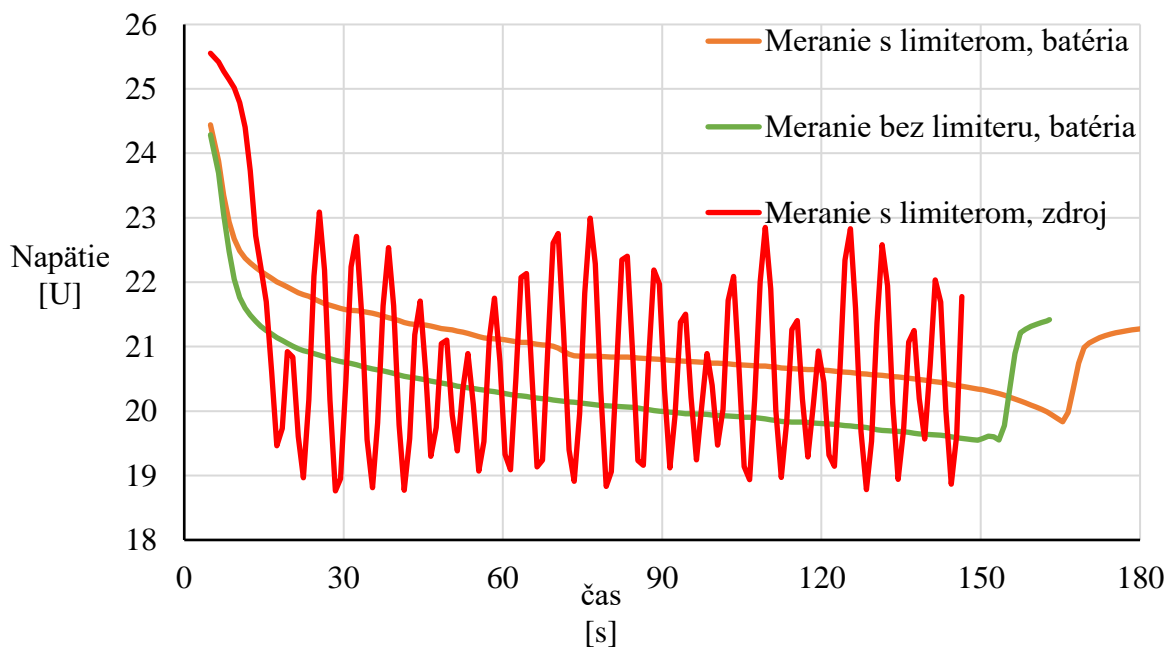
Obr. č. 9-17: Vrtuľa APC 22x10E - Závislosť príkonu na čase

Druhá séria meraní bola prevedená pre porovnanie troch situácií: prvou bolo klasické meranie so zapojeným limiterom a batériou, druhou meranie s limiterom na

zdroji a treťou bolo meranie bez zapojeného limiteru na batérii. Na týchto meraniach je jasne demonštrovaná nemožnosť použitia zdroju pre realistické meranie. Zdroj nebol schopný udržať dostatočné napätie v obvode pri zaťažení, čo sa prejavovalo okrem zníženia príkonu (a teda aj otáčok a ťahu) aj značným pulzovaním. Pulzovanie napätia možno vidieť napríklad na Obr. č. 9-19. Rozdiel medzi meraním s batériou a zdrojom bol približne 400 - 500 ot/min.

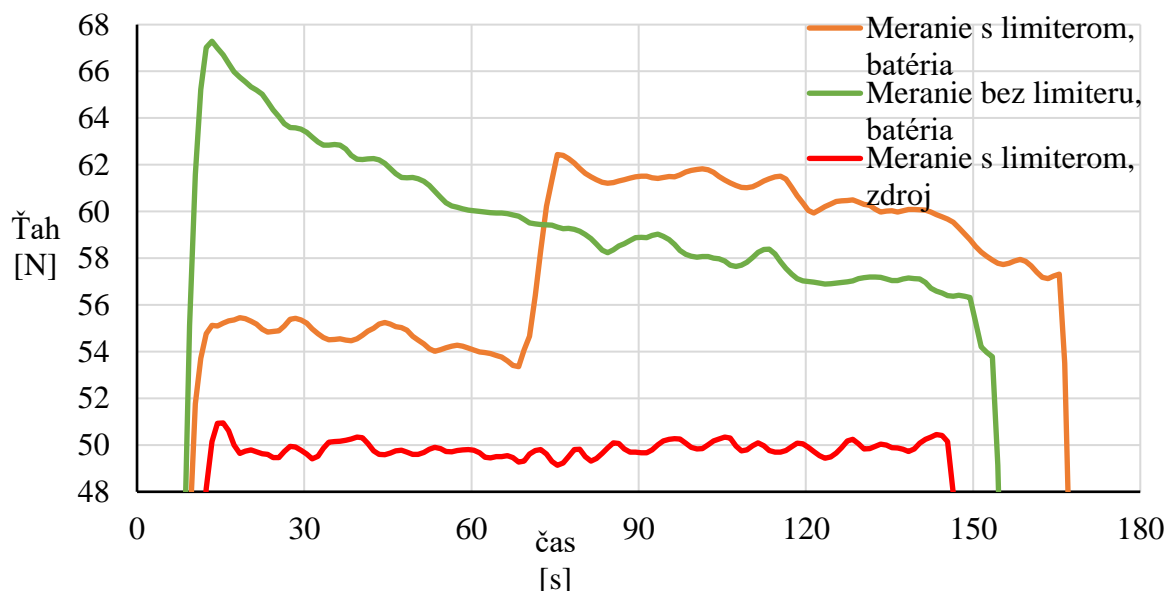


Obr. č. 9-18: Vrtuľa APC 22x10E – Závislosť otáčok na čase behu motora pri využití batérie/zdroju a so zapojeným limiterom resp. bez zapojeného limiteru



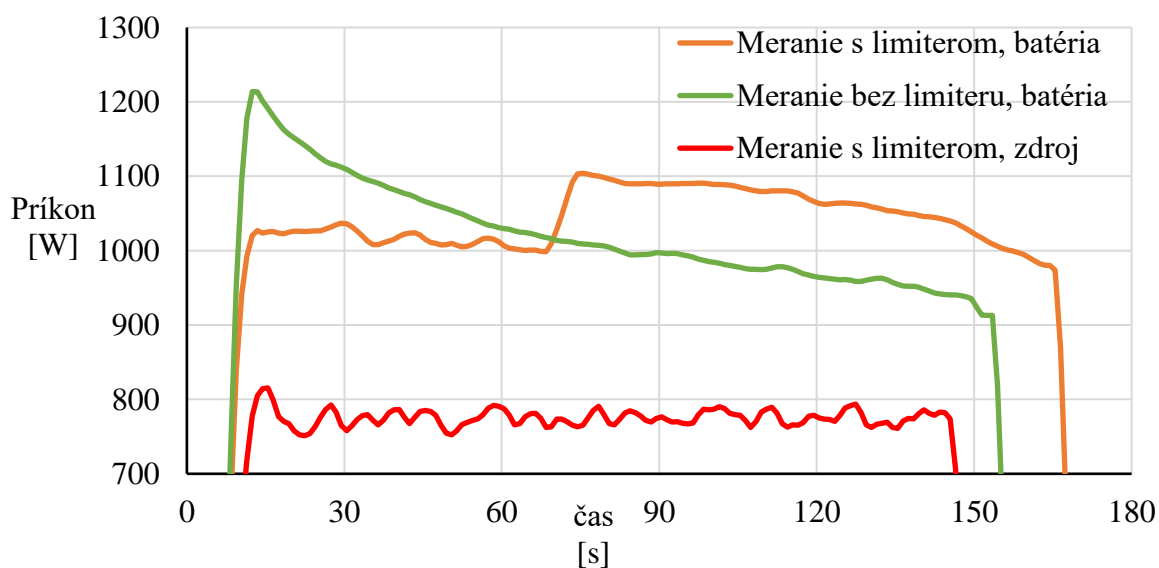
Obr. č. 9-19: Vrtuľa APC 22x10E – Závislosť napätia na čase behu motora pri využití batérie/zdroju a so zapojeným limiterom resp. bez zapojeného limiteru

Pri meraní bez limiteru boli zisťované parametre pohonu bez obmedzenia. Tento rozdiel prekvapivo bol približne len 300 ot/min, z čoho vyplýva, že vrtuľa APC 22x10E takmer dosahuje svojho výkonového potenciálu aj s limiterom. Z merania tiež vyplývajú závislosti na Obr. č. 9-18 a tiež zbytočnosť použitia vrtule väčšieho priemeru (príp. väčšieho stúpania), ktorá by potrebovala ešte väčší výkon motoru.



Obr. č. 9-20: Vrtuľa APC 22x10E – Závislosť ťahu na čase behu motora pri využití batérie/zdroju a so zapojeným limiterom resp. bez zapojeného limiteru

Pri porovnaní ťahu s a bez limiteru je na Obr. č. 9-20 vidno, že rozdiel v počiatkovej fáze letu je približne 12 N. Rozdiel medzi príkonom bez a s limiterom je približne 200 W čo vidno na Obr. č. 9-21. Meranie na zdroji ukázalo jeho nevhodnosť pre merania tohto pohonu z dôvodu nedostatku dodaného príkonu (len do 800 W).



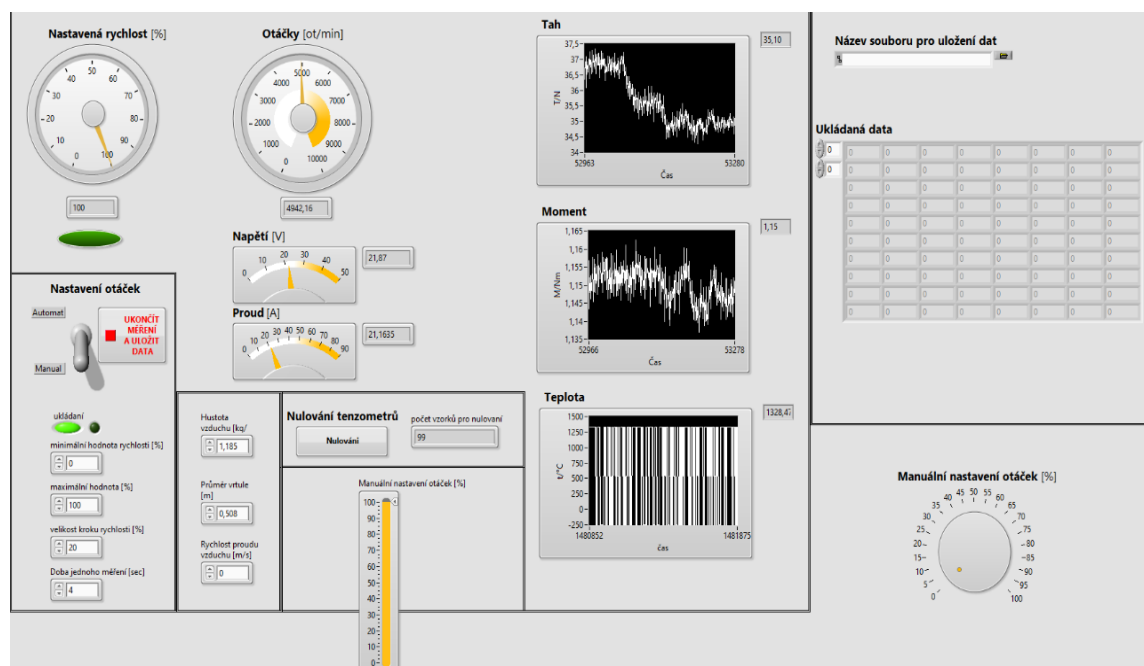
Obr. č. 9-21: Vrtuľa APC 22x10E – Závislosť príkonu na čase behu motora pri využití batérie/zdroju a so zapojeným limiterom resp. bez zapojeného limiteru

9.2. Meranie v aerodynamickom tuneli

Popri meraniach statického ťahu bolo tiež uskutočnené meranie v aerodynamickom tuneli. Toto meranie bolo prevedené v spolupráci s Ing. Filipom Kublákom a Ing. Ondřejom Uhrom z pražskej časti tímu Chicken Wings a Bc. Jiřím Walterom na Ústave Mechaniky Tekutin a Termomechaniky Fakulty Strojní na ČVUT Praha. Pre meranie bol použitý tzv. fialový tunel, ktorého parametre sú uvedené v Tab. č. 8. Pri meraniach bola dosiahnutá rýchlosť približne 12 m/s, čo je rýchlosť mierne nad vzletovou. Táto rýchlosť bola vyhodnotená ako postačujúca, pretože pre model na ročník 2022 je najkritickejší ťah práve pri týchto rýchlostiach. Merania boli prevedené pri približnej hustote vzduchu $1,185 \text{ kg/m}^3$. Merania boli prevedené pre vrtule APC 20x8E, APC 20x11E a APC 22x10E. Cieľom bolo skúmať zmenu parametrov s letovou rýchlosťou. Pri meraniach bola využitá aplikácia Bc. Jiřího Waltera v programe Labview (Obr. č. 9-22), kde hodnoty napätia a prúdu boli overované externými meraniami. Hodnoty príkonu, rýchlostného pomeru, súčiniteľov výkonu a ťahu boli vypočítané pomocou vzorcov (3.1), (7.13), resp. úpravou vzorcov (7.10) a (7.11).

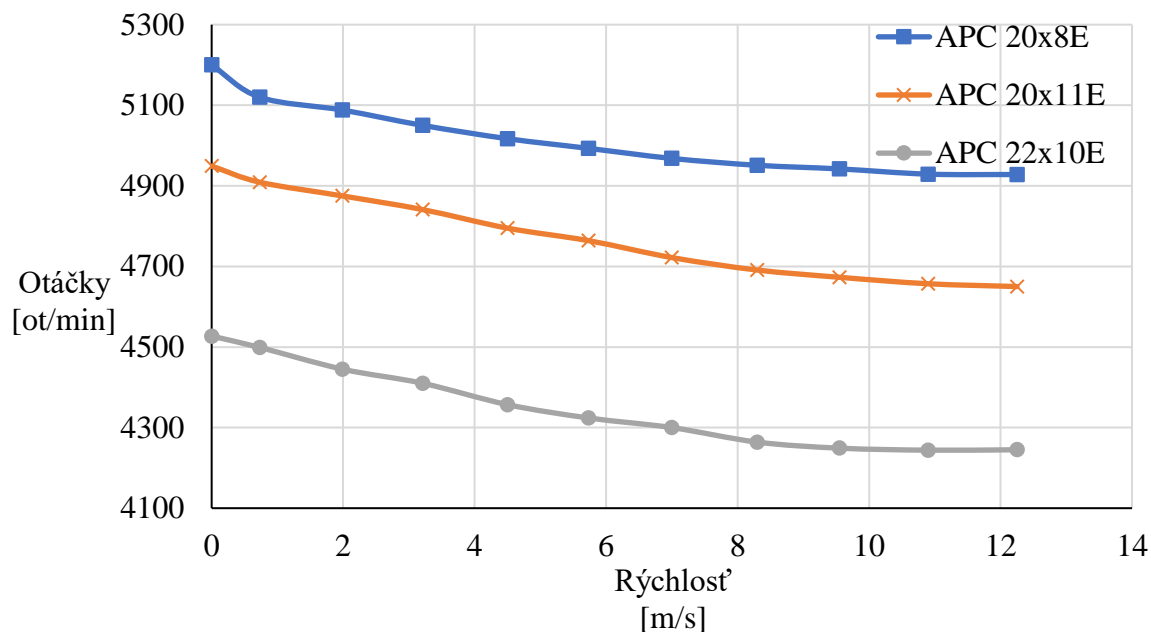
Tab. č. 8: Parametre aerodynamického tunelu

		Jednotky
Typ	Tunel s otvoreným okruhom	[-]
Maximálna rýchlosť prúdu	12	[m/s]
Rozmery ústia dýzy	550 x 750	[mm]
Pohonná jednotka	Asynchronný motor	[-]
Menovitý výkon pohonnej jednotky	55	[kW]
Typ ventilátoru	Radiálny	[-]



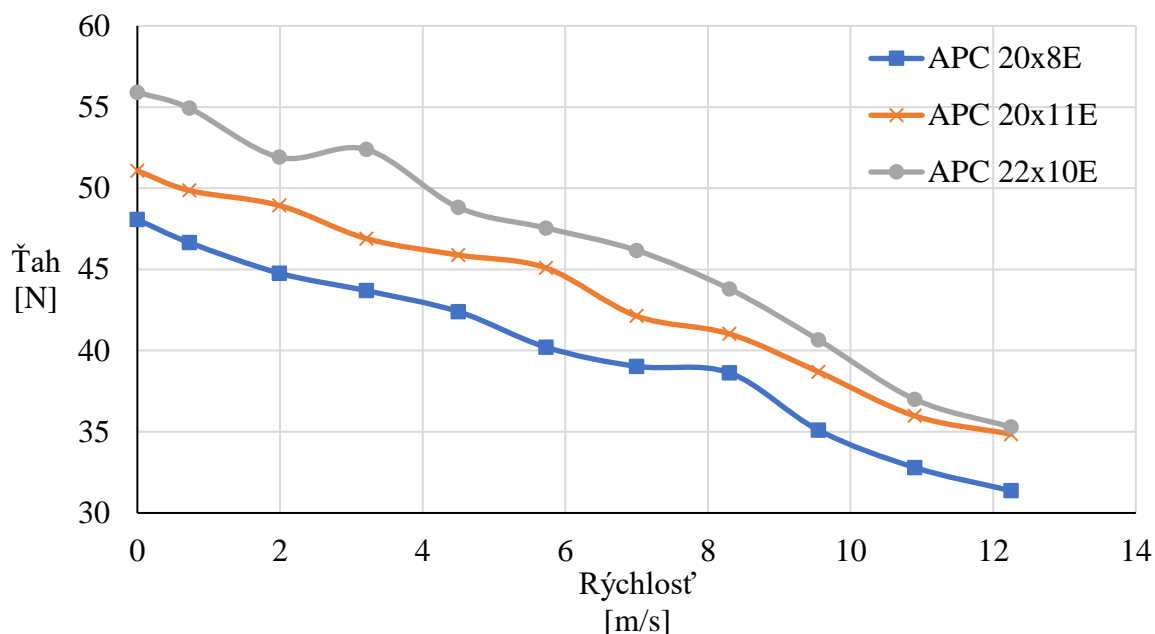
Obr. č. 9-22: Ukážka aplikácie využitej pri meraniach v aerodynamickom tuneli

Pri meraniach sa potvrdilo, že otáčky vrtule so stúpajúcou rýchlosťou klesajú. Zmena otáčok bola pri každej vrtuli približne 200 ot/min, čo je vidieť na Obr. č. 9-23. V súvislosti s tým nastal aj pokles ťahu a potrebný výkon motora. Pri ťahu na Obr. č. 9-24, možno pozorovať prudší pokles ťahu s rýchlosťou pri vrtuliach s menším stúpaním. Pokles ťahu sa pohyboval medzi 15 – 20 N ťahu, pričom najväčší pokles ťahu bol zaznamenaný na vrtuli APC 22x10E (približne 20 N) a najnižší pri vrtuli APC 20x11E (približne 16 N).



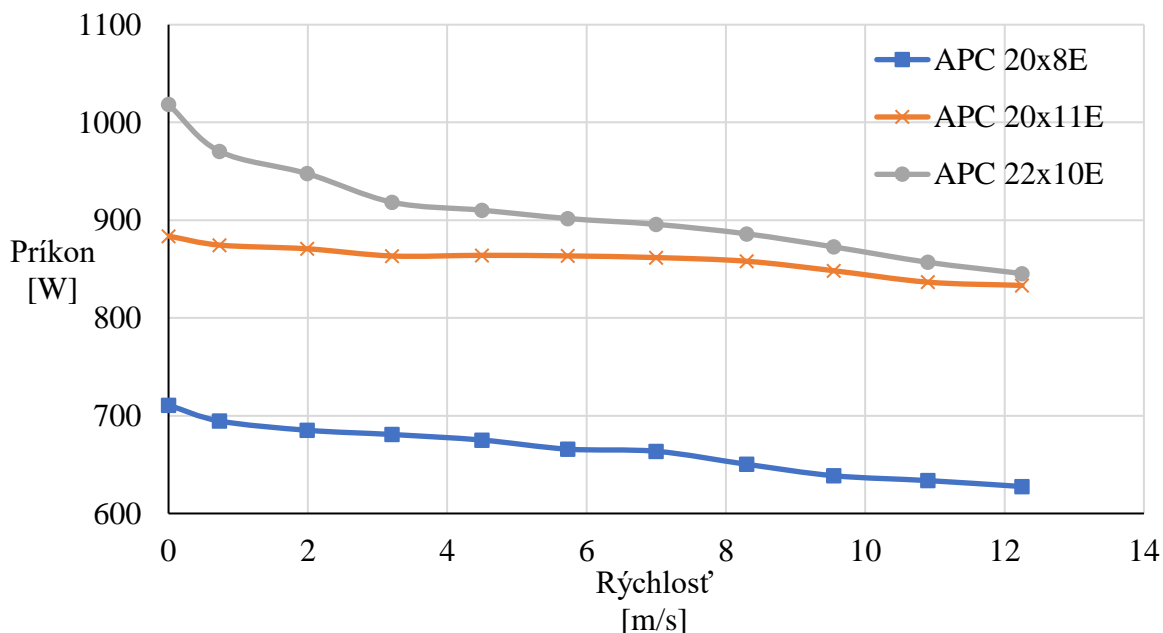
Obr. č. 9-23: Závislosť otáčok na rýchlosti

Treba poznamenať, že statický ťah nameraný pomocou VUT standu bol považovaný za presnejší ako statický ťah nameraný na stande pred meraním v aerodynamickom tuneli, vzhľadom na stále prebiehajúci vývin aplikácie. Pokles parametrov v závislosti na rýchlosti je preto potrebné brať orientačne podobne ako výpočty. Pri porovnaní však možno vidieť, že zmena ťahu zistená meraniami v aerodynamickom tuneli zhruba odpovedá zmene v údajoch výrobcu v kapitole 8.



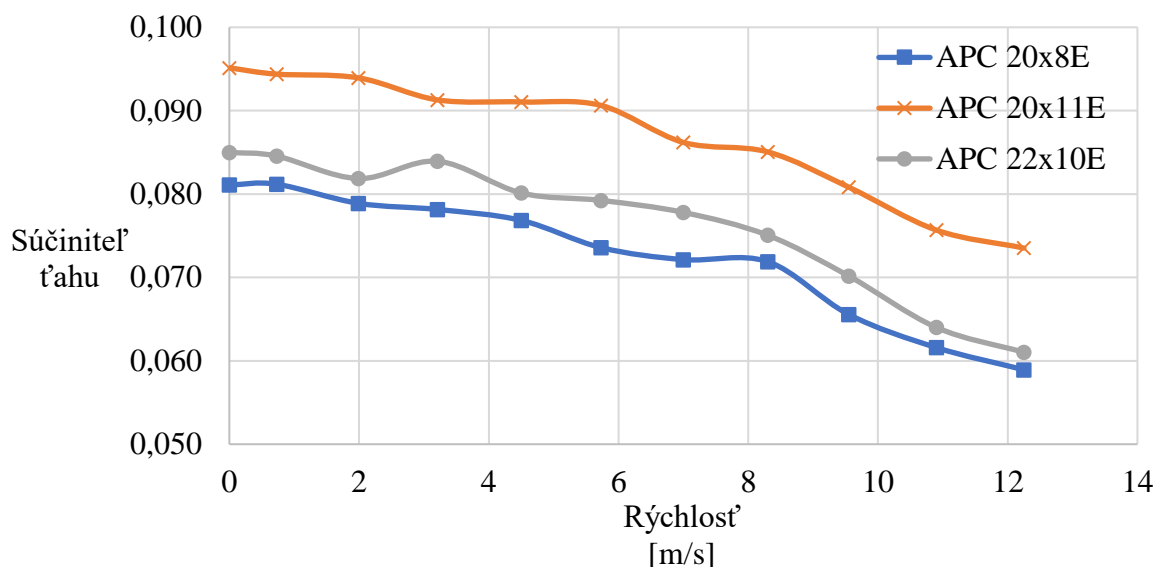
Obr. č. 9-24: Závislosť ťahu na rýchlosti

Pokles príkonu sa najvýraznejšie prejavil pri vrtuli APC 22x10E o približne 250 W. Pri oboch vrtuliach priemeru 20 palcov bola zmena príkonu motora v rádoch desiatok wattov čo možno vidieť na Obr. č. 9-25. Možno predpokladať, že pri vyšších rýchlostiach by bol pokles príkonu so stúpajúcou rýchlosťou najnižší pri vrtuli APC 20x11E s väčším stúpaním. Rozdiel príkonu je omnoho menej výrazný ako v údajoch výrobcu. Príkon bol počítaný pomocou vzorca (3.1), pričom rozdiel v hodnotách oproti údajom výrobcu v kapitole 8 možno pripísať chybám pri meraní elektrického prúdu.



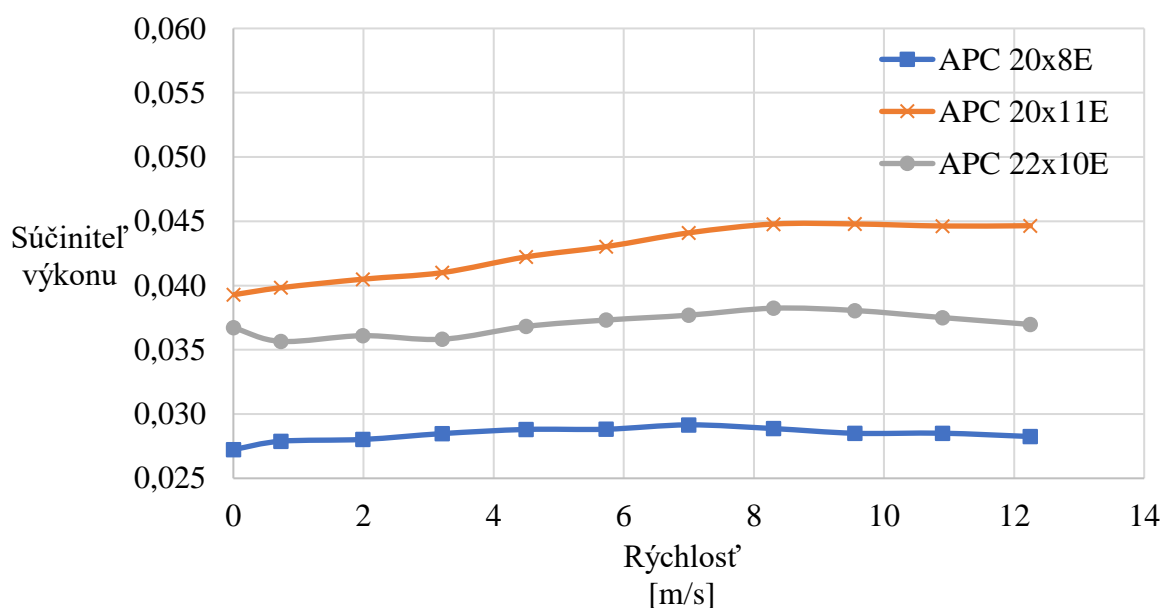
Obr. č. 9-25: Závislosť príkonu od rýchlosti

Na Obr. č. 9-26 možno pozorovať závislosť súčiniteľa ťahu od rýchlosti. Z obrázku možno jasne vidieť, že súčiniteľ ťahu sa zvyšuje so zväčšovaním priemeru vrtule a výraznejšie sa zvyšuje pri väčšom stúpaní vrtule. Pri porovnaní s údajmi výrobcu v kapitole 8, sú odmerané hodnoty podobné a krivky rovnako spĺňajú predpoklad postupného poklesu. Je možné predpokladať miernejší pokles krivky vrtule APC 20x11E, resp. dosiahnutie vyššej rýchlosti pri ktorej bude súčiniteľ ťahu nulový.



Obr. č. 9-26: Závislosť súčiniteľa ťahu na rýchlosti

Pri závislosti súčiniteľa výkonu na rýchlosti bol podľa údajov výrobcu v kapitole 8, predpokladaný pokles kriviek. Tento predpoklad po vynesení závislostí z meraní v tuneli na Obr. č. 9-27, nebol splnený. Možno to pripisovať chybnému meraniu elektrického prúdu, z ktorého pomocou výpočtu vyšli chybné hodnoty príkonu.



Obr. č. 9-27: Závislosť súčiniteľa výkonu na rýchlosti

10. ZHRNUTIE KONCEPCIE POHONU

Na základe meraniami zistených reakcií limiteru na väčší príkon ako 1000 W, bolo možné rozhodnúť o výbere odlišného pohonu od modelu pre ročník 2022. Je nutné podotknúť, že ani niekoľkými sériami meraní, nebolo zaručené dokonale predvídateľné správanie limiteru. Po konzultáciách s členmi tímu Chicken Wings, ktorí mali na súťaži niekoľko rozhovorov so zástupcami výrobcu limiteru a konzultáciách s členmi iných tímov s väčšími skúsenosťami so súťažou SAE Aero Design, bolo pri rozhodovaní o pohone brané v úvahu odmerané obmedzenie príkonu na úrovni 1100 W. Všetky dlhodobejšie hodnoty nad touto hranicou preto neboli brané ako zaručené pre pohon.

Meraniami bolo overené, že je možné zvoliť dve varianty pohonu, jednu úplne bezpečnú, ale s menším ťahom ako verziu pri ktorej môžu nastať komplikácie pri nepredvídateľnom správaní limiteru. Základom pohonnej sústavy je batéria typu Li-Pol o meraniami overenej, postačujúcej kapacity 3500 mAh, motor AXI 5325/20, limiter a regulátor MEZON Pro OPTO 55.

Maximálny ťah dosiahnutý vrtuľou APC 20x11E pri maximálnom príkone motora na úrovni 1000 – 1100 W, sa pohyboval v rozmedzí hodnôt 56 – 58 N. Bolo dokázané, že táto pohonná sústava je schopná minimálne 180 sekúnd dlhého letu, pričom je možné predpokladať, že pri použití novej batérie by sa čas zvýšil. Počas merania ťah poklesol ku hodnote približne 41 N. Hodnoty maximálneho elektrického prúdu sa pohybovali v rozmedzí 47 – 50 A, čo je pod hodnotou maximálneho dovoleného prúdu pre vybraný regulátor. Pri vrtuli APC 20x11E neboli zistené nijaké neočakávané reakcie limiteru, preto tento pohon možno vyhlásiť za bezpečný.

Pri vrtuli APC 22x10E boli zistené neočakávané reakcie limiteru pri dvoch z troch meraní. Zo začiatku pri všetkých troch meraniach limiter príkon obmedzil. V tejto fáze maximálny dosiahnutý ťah dosahoval hodnôt 56 – 60 N pri hodnotách maximálneho elektrického prúdu na úrovni 46 – 48 A. Po približne 70 sekundách behu motora sa príkon skokovo zvýšil o približne 100 – 200 W a ťah narástol na 63 – 67 N. Maximálny prúd vzrástol na hodnoty 54 – 56 A, čo je už nad hranicou maximálneho výrobcom doporučeného prúdu. Tieto hodnoty nie je možné brať ako štandardné vzhľadom k faktu, že ide o poruchovú situáciu. Bolo dokázané, že táto pohonná sústava je schopná minimálne 170 sekúnd dlhého letu pri používanej batérii a minimálne 240 sekúnd pri použití takmer novej batérie. Ku koncu merania ťah postupne klesol na hodnoty 54 – 56 N.

Rozdiel ťahu medzi vrtuľou APC 20x11E a APC 22x10E pri funkčnom limiteri sa pohyboval v hodnotách do 4 N. Pre zaručene bezpečnú prevádzku je možné odporučiť pohon s vrtuľou APC 20x11E, ktorá dosahuje v prvotnej fáze veľmi podobných výkonov ako vrtuľa APC 22x10E, bez rizika nepredvídaného správania limiteru. Vrtuľu APC 22x10E je taktiež možné použiť vzhľadom, hoci pri nej nastáva riziko nepredvídateľného správania sa limiteru. Vzhľadom na merania je však možné usúdiť, že

limiter pri presiahnutí hraničného príkonu nie je náchylný k pulzovaniu a chyba funkčnosti sa prejavuje zvýšením príkonu a teda aj ťahu. Na základe tohto vyhodnotenia možno odporučiť pohon s vrtuľou APC 22x10E, pretože ťah dosahovaný s jeho pomocou bol o 2 – 4 N vyšší ako pomocou vrtule APC 20x11E a približne o 6 – 10 N vyšší ako pohon pomocou vrtule APC 20x8E.

11. ZÁVER

Úlohou tejto bakalárskej práce bolo navrhnúť a overiť pohonnú sústavu pre súťažný model lietadla študentského tímu Chicken Wings pre ročník 2022 na súťaži SAE Aero Design East. Výpočty a merania vychádzali z pravidiel a obmedzení súťaže, ktoré sú pre tri po sebe nasledujúce ročníky z veľkej časti identické. Cieľom bolo vylepšenie konceptu pohonu z ročníka 2020, teda zvýšenie ťahu a následné zvýšenie nosnosti lietadla resp. bodového zisku.

Na základe teoretickej rešerše a výpočtov boli vybrané batérie, motory a regulátor, ktoré boli následne overované pomocou meraní. V práci boli ďalej porovnané údaje od výrobcu vrtulí. Z nich boli vyjadrené závislosti parametrov v závislosti na rýchlosti a otáčkach. Na základe závislostí boli vybrané tri vrtule pre ďalšie merania. Pomocou meraní bolo zistené, že zvolená kapacita batérií na úrovni 3500 mAh je pre každý typ pohonu postačujúca. Ako motor bol vybraný AXI 5325/20, pri ktorom bola overená plná funkčnosť a spoľahlivosť pri prevádzke so všetkými vrtuľami.

Pre vybrané tri vrtule, APC 20x8E, APC 20x11E, APC 22x10E, boli prevedené merania statického ťahu na VUT stande a meranie parametrov v závislosti na rýchlosti v aerodynamickom tuneli v spolupráci s členmi pražskej časti tímu Chicken Wings. Pri meraniach bolo tiež zistené fungovanie limitera. Pri vrtuliach APC 20x11E a APC 22x10E bolo zistené prekročenie 1000 W obmedzenia, pričom pri prvej vrtuli sa reakcia limiteru výrazne neprejavila. Pri vrtuli APC 22x10E sa reakcia limiteru výraznejšie prejavila, pričom neboli potvrdené obavy o pulzáciu motora pri vyššom než hraničnom príkone. Reakcia limiteru spočívala v obmedzení príkonu medzi hodnotami 1000 – 1100 W, pričom nežiadúcou reakciou limiteru bolo následné zrušenie obmedzenia po približne 70 sekundách behu motora. Táto reakcia v skutočnosti model nijako neohrozuje a vzhľadom na stálu signalizáciu funkčnosti limiteru nie je ani proti pravidlám súťaže. Zvýšenie ťahu oproti pôvodnému pohonu z ročníku 2020 bolo na úrovni 10 - 15 %.

V poslednej časti práce bolo prevedené meranie závislostí meraných parametrov na rýchlosti v aerodynamickom tuneli pri rýchlostiach rozbehu modelu lietadla pri štarte. Na základe týchto meraní boli porovnané merané závislosti parametrov pohonu so závislosťami vyjadrenými na základe údajov výrobcu.

Na základe meraní dosiahnutých v tejto práci, je možné zvýšiť nosnosť modelu lietadla pre ročník 2022 súťaže SAE Aero Design East. Vďaka vyššej hmotnosti nákladu, resp. vyššiemu počtu prepravených kusov sférického nákladu je možné zvýšiť počet získaných bodov a získať vyššie umiestnenie.

ZOZNAM POUŽITÝCH ZDROJOV

- [1] RAYMER, D.: Aircraft design: a conceptual approach. 3. print. Washington: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1989. ISBN 09-304-03517.
- [2] GUDMUNDSSON, S.: General aviation aircraft design: applied methods and procedures. Oxford: Elsevier, 2014. ISBN 978-0-12-397308-5.
- [3] HOŘENÍ, Bohumír a Jaroslav LNĚNIČKA. Letecké modelářství a aerodynamika. Praha: Naše vojsko, 1977. Knihovna Svazarmu. Řada modelářů.
- [4] HOŘEJŠÍ, Milan. Aerodynamika létajících modelů: profil, křídlo, vrtule. Praha: Naše vojsko, 1957. Knihovna leteckého modelářství.
- [5] CETL, Tomáš. Aplikace elektrochemických zdrojů. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2004. ISBN 80-01-02859-3.
- [6] KELLER, Ladislav. Učebnice pilota 2013: pro žáky a piloty všech druhů letounů sportovních létajících zařízení, provozujících létání jako svou zájmovou činnost, Cheb: Svět křídel, 2013. ISBN 978-80-87567-26-5
- [7] DANĚK, Vladimír. Mechanika letu. I, Letové výkony. Druhé vydání, Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2019. ISBN 978-80-7623-014-9
- [8] HOŘEJŠÍ, Ivan. Elektrolyty a jak na to. Plzeň: APEX-ART, 2008
- [9] Ducting Configuration. *SCHÜBELER JETS* [online]. 2021 [cit. 16.02.2021]. Dostupné z: <https://www.schuebeler-jets.de/en/edf-know-how-en/configuration-of-the-channels>
- [10] Power to Weight Ratio. *SCHÜBELER JETS* [online]. 2021 [cit. 16.02.2021]. Dostupné z: <https://www.schuebeler-jets.de/en/edf-know-how-en/power-to-weight-ratio>
- [11] MADAAN, Pushek. Brushless DC motors: Construction and operating principles. *EDN* [online]. [cit. 2021-03-16]. Dostupné z: <https://www.edn.com/brushless-dc-motors-part-i-construction-and-operating-principles/>
- [12] KIRCHEV, Angel. Battery Management and Battery Diagnostics. *Electrochemical Energy Storage for Renewable Sources and Grid Balancing*. Elsevier, 2015, s. 411 - 435. ISBN 9780444626165. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/B978-0-444-62616-5.00020-6>
- [13] ANĎAL, Jozef. Modelárske akumulátory, kto sa v tom má vyznať. *HT MODEL*. [online]. 2021, [cit. 18.01.2021]. Dostupné z: <https://htmodel.sk/modelarske-akumulatory-kto-sa-v-tom-ma-vyznat/>
- [14] Proč používat LiFePO baterie?, *ABCTECH – výpočetní technika a elektronika* [online]. 2021, [cit. 10.01.2021]. Dostupné z: <https://www.abctech.cz/default.asp?show=wm&wmpart=article&wmaid=87>

- [15] Modelářské elektromotory – 1. a 2. díl. *HOBIX* [online]. 2021, [cit. 14.02.2021]. Dostupné z: <https://www.rc-zoom.cz/modelarske-elektromotory-1-dil/> resp. <https://www.rc-zoom.cz/modelarske-elektromotory-2-dil/>
- [16] Letecké modelářské spalovací motory – úvod. *HOBIX*. [online]. 2021 [cit. 19.02.2021]. Dostupné z: <https://www.rc-zoom.cz/letecke-modelarske-spalovaci-motory-uvod/>
- [17] ZÁRYBNICKÝ, Vít . Aerodynamika: Aerodynamika podzvukových rychlostí. Praha: Výcvikové středisko ŘLP ČR, s.p, 1999
- [18] SAE Aero Design Rules Committee. 2020 SAE Aero Design Rules [online]. 2019 [cit. 21.01.2020]. Dostupné z: <https://www.sae-aerodesign.com/cdsweb/gen/DocumentResources.aspx>
- [19] Konvence značení motorů. *AXI MODEL MOTORS s.r.o* [online]. 2021 [cit. 01.04.2021]. Dostupné z: <https://www.modelmotors.cz/cs/konvence-znacen-motoru/>
- [20] AXI 4120/18 GOLD LINE V2. *AXI MODEL MOTORS s.r.o.* [online]. 2021 [cit. 02.04.2021]. Dostupné z: <https://www.modelmotors.cz/cs/product/detail/273/>
- [21] AXI 5325/20 GOLD LINE V2. *AXI MODEL MOTORS s.r.o.* [online]. 2021 [cit. 02.04.2021]. Dostupné z: <https://www.modelmotors.cz/cs/product/detail/263/>
- [22] Bighobby-NANO Tech 3500mAh 6S 60C (120C). *RC MODELÁŘINA BigHobby.cz* [online]. 2021 [cit. 03.04.2021]. Dostupné z: <https://www.bighobby.cz/bighobby-nano-tech-3500mah-6s-60c--120c/>
- [23] Topmodel CZ – Akku LiPol XPower 3300-6S ULT 70C. *TOPMODEL CZ* [online]. 2021 [cit. 03.04.2021]. Dostupné z: https://www.topmodelcz.cz/index.php?&desktop_back=eshop&action_back=&id_back=0&desktop=eshop&action=zbozi_detail&id=25580
- [24] GENS ACE LiPo – 6S 3700mAh 22,2V 6S1P (60C). *MODELÝ, MAKET Y – PECKA MODELÁŘ* [online]. 2021 [cit. 03.04.2021]. Dostupné z: <https://www.peckamodel.cz/b-60c-3700-6s1p-gens-ace-lipo-6s-3700mah-22-2v-60c>
- [25] KMINIAKOVÁ, Tatiana. Návrh ocasních ploch a trupu soutěžního modelulétounu. Brno, 2020. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zavprace/detail/125225>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Letecký ústav. Vedoucí práce Luboš Janhuba.
- [26] Střídavé regulátory. *Bezdrátové systémy pro dálkové ovládání modelů – JETI MODEL s.r.o.* [online]. 2021 [cit. 04.04.2021]. Dostupné z: <http://www.jetimodel.com/cs/katalog/Regulatory-otacek/Stridave-regulatory/>

- [27] MEZON 55 Pro OPTO. *Bezdrátové systémy pro dálkové ovládání modelů - JETI MODEL s.r.o.* [online]. 2021 [cit. 04.04.2021]. Dostupné z: <https://shop.jetimodel.cz/mezon-55-pro-opto.htm>
- [28] MEZON 85 Pro OPTO. *Bezdrátové systémy pro dálkové ovládání modelů – JETI model s.r.o..* [online]. 2021 [cit. 04.04.2021]. Dostupné z: <https://shop.jetimodel.cz/mezon-85-pro-opto.htm>
- [29] SAE Aero Design West. *SAE International.* [online]. 2021 [cit. 04.04.2021]. Dostupné z: <https://www.sae.org/attend/student-events/sae-aero-design-west/about>
- [30] SAE Aero Design Rules Committee. *2021 SAE Aero Design Rules.* [online]. 2021 [cit. 07.04.2021]. Dostupné z: <https://www.sae-aerodesign.com/cdsweb/gen/DocumentResources.aspx>
- [31] Performance Data. *APC Propellers.* [online]. 2021 [cit. 12.04.2021]. Dostupné z: <https://www.apcprop.com/technical-information/performance-data/>
- [32] APC vrtule 19x8E pravotočivá. *PELIKAN DANIEL.* [online]. 2021 [cit.12.04.2021]. Dostupné z: <https://www.pelikandaniel.com/?sec=product&id=113029>
- [33] APC vrtule 24x12E pravotočivá. *PELIKAN DANIEL.* [online]. 2021 [cit.12.04.2021]. Dostupné z: <https://www.pelikandaniel.com/?sec=product&id=113045>
- [34] APC vrtule 22x10E pravotočivá. *PELIKAN DANIEL.* [online]. 2021 [cit.12.04.2021]. Dostupné z: <https://www.pelikandaniel.com/?sec=product&id=113042>
- [35] APC vrtule 20x11E pravotočivá. *PELIKAN DANIEL.* [online]. 2021 [cit. 12.04.2021]. Dostupné z: <https://www.pelikandaniel.com/?sec=product&id=113034>
- [36] APC vrtule 20x8E pravotočivá. *REICHARD MODELSPORT.* [online]. 2021 [cit. 12.04.2021]. Dostupné z: <https://eshop.reichard.cz/prislusenstvi/vrtule/apc-vrtule-20x8e-pravotociva.html>
- [37] Propeller 22x10 CCW 2B EL. *MEJZLIK PROPELLERS.* [online]. 2021 [cit.12.04.2021]. Dostupné z: <http://shop.mejzlik.eu/propeller-22x10-ccw-2b-e-1/>
- [38] ZEMAN, P. Rozbor koncepcí multivrtulových bezpilotních prostředků. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2017. 74 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Petr Dvořák.
- [39] SAE Aero Design Rules Committee. *2020 SAE Aero Design Rules* [online]. 2019 [cit. 21.01.2020]. Dostupné z: <https://www.sae-aerodesign.com/cdsweb/gen/DocumentResources.aspx>

- [40] Lithium-Ion state of Charge (SoC) Measurement. *Scalable Lithium-ion Solutions & Storage System – PowerTech Systems* [online]. 2021 [cit. 11.02.2021]. Dostupné z: <https://www.powertechsystems.eu/home/tech-corner/lithium-ion-state-of-charge-soc-measurement/>
- [41] Bighobby-NANO Tech 3500mAh 6S 60C (120C). *RC MODELAŘINA BigHobby.cz* [online]. 2021 [cit. 03.04.2021]. Dostupné z: <https://www.bighobby.cz/bighobby-nano-tech-3500mah-6s-60c--120c-/>
- [42] Motor GP 38ccm včetně tlumiče a příslušenství. *PELIKANDANIEL*. [online]. 2021 [cit. 13.04.2021]. Dostupné z: <https://www.pelikandaniel.com/?sec=product&id=127705>
- [43] HDS Fans. *SCHÜBELER JETS* [online]. 2021 [cit. 16.02.2021]. Dostupné z: <https://www.schuebeler-jets.de/en/products/hds-en>
- [44] MADAAN, Pushek. Brushless DC motors: Construction and operating principles. *EDN* [online]. [cit. 2021-03-16]. Dostupné z: <https://www.edn.com/brushless-dc-motors-part-i-construction-and-operating-principles/>
- [45] MEZON 55 Pro OPTO. *Bezdrátové systémy pro dálkové ovládání modelů – JETI MODEL s.r.o.* [online]. 2021 [cit. 04.04.2021]. Dostupné z: <https://shop.jetimodel.cz/mezon-55-pro-opto.htm>
- [46] DYTRYCH, Jan. Aerodynamika vrtule - Princip. *Jan Dytrych – WWW pages* [online]. 2021 [cit. 03.05.2021]. Dostupné z: <http://home.tiscali.cz/cz281908/>
- [47] DYTRYCH, Jan. Typy vrtulí. *Jan Dytrych – WWW pages* [online]. 2021 [cit. 03.05.2021]. Dostupné z: <http://home.tiscali.cz/cz281908/>
- [48] HOŘENÍ, Bohumír a Jaroslav LNĚNIČKA. Letecké modelářství a aerodynamika. Praha: Naše vojsko, 1977. Knihnice Svazarmu. Řada modelářů. s. 181
- [49] SAE 2021 limiters. *NEUTRONICS* [online]. 2021 [cit. 04.05.2021]. Dostupné z: <https://neumotors.cartloom.com/storefront/product/sae-2021-limiters>
- [50] Olověné akumulátory. *AVACOM-baterie & akumulátory* [online]. 1997 [cit. 14.03.2021]. Dostupné z: <https://www.avacom.cz/olovene-akumulatory/informace-k-pb-bateriim>

ZOZNAM SKRATIEK A ZNAKOV

Označenie	Jednotka	Názov
SAE	[-]	Society of Automotive Engineers
MTOW	[kg ; lbs]	Maximálna vzletová hmotnosť
FRP	[-]	Fiber-reinforced plastic
PPB	[-]	Bonus za odhad preneseného materiálu
FFS	[-]	Celková suma bodov za letovú časť
RC	[-]	Rádiom ovládaný
NiCd	[-]	Nikel Kadmiové
NiMH	[-]	Nikel Metalhydridové
Li-Pol	[-]	Lítium Polymérové
Li-Ion	[-]	Lítium Ionové
Li-Fe	[.]	Lítium Železné
Pb	[-]	Olovené
HV	[V]	Vysoké napätie
Li-Fe-PO ₄	[-]	Lítium-železo-fosfátový
AGM	[-]	Textília zo skleného vlákna nasiaknutá elektrolytom
AXI	[-]	Značka motorov výrobcu MODEL MOTORS s.r.o.
APC	[-]	Názov firmy – Advanced Precision Composites
GLOW	[-]	Žhaviaci motor
EDF	[-]	Opláštené elektrické dúchadlo
KV	[ot/V]	Číslo otáčok na jeden volt
PWR	[W/kg]	Pomer výkonu k hmotnosti
BLDC	[-]	Bezkontaktný elektricky komutovaný jednosmerný motor
VN	[V]	Vysokonapäťový
NN	[V]	Nízkonapäťový
BEC	[-]	Stabilizátor/menič napätia
D	[mm ; in]	Priemer
PPM	[-]	Pulzne polohová modulácia

ZOZNAM OBRÁZKOV

Obr. č. 2-1: Schéma letovej misie pre ročník 2020	16
Obr. č. 2-2: Porovnanie konfigurácií pre ročník 2020	18
Obr. č. 2-3: Porovnanie konfigurácií pre ročník 2021	19
Obr. č. 2-4: Schéma pohonu.....	20
Obr. č. 3-1: Vybíjacie krivky batérií	21
Obr. č. 3-2: Vybíjacia charakteristika batérie Li-Pol (BighobbyNANO 3500mAh)	23
Obr. č. 3-3: Batéria Bighobby Nano Tech 3500mAh 22.2V 60C (120C)	27
Obr. č. 4-1: Motor GP 38 - benzínový jednovalcový motor o obsahu 38cm ³	29
Obr. č. 4-2: Charakteristika BLDC motoru	30
Obr. č. 5-1: Regulátor MEZON Pro OPTO 55	33
Obr. č. 5-2: Porovnanie originálneho (horný) a upraveného (spodný) regulátora	34
Obr. č. 6-1: Limiter NeuMotors V2 SAE 2019 1000 W	35
Obr. č. 7-1: Sily, uhly a rýchlosti pôsobiace na profil vrtuľového listu (upravené)	38
Obr. č. 7-2: Staviteľná vrtuľa pri rôznych letových režimoch (upravené).....	39
Obr. č. 7-3: Režimy práce vrtule (upravené).....	43
Obr. č. 7-4: EDF dúchadlo DS-68-AXI HDS (110mm) od výrobcu Schübeler jets	44
Obr. č. 8-1: Závislosť súčiniteľa ťahu na rýchlosti pri najvhodnejších otáčkach vrtulí..	48
Obr. č. 8-2: Závislosť súčiniteľa výkonu na rýchlosti pri najvhodnejších otáčkach vrtulí	49
Obr. č. 8-3: Závislosti ťahu na rýchlosti pre rozsah predpokladaných otáčok.....	50
Obr. č. 8-4: Závislosti príkonu na rýchlosti pre rozsah predpokladaných otáčok.....	51
Obr. č. 9-1: Náčrt VUT standu.....	52
Obr. č. 9-2: Vrtuľa APC 20x8E – Závislosť otáčok na čase behu motora.....	53
Obr. č. 9-3: Vrtuľa APC 20x8E - Závislosť napätia na čase	54
Obr. č. 9-4: Vrtuľa APC 20x8E – Závislosť ťahu od otáčok	54
Obr. č. 9-5: Vrtuľa APC 20x8E - Závislosť ťahu na čase behu motora.....	55
Obr. č. 9-6: Vrtuľa APC 20x8E – Závislosť príkonu od otáčok	55
Obr. č. 9-7: Vrtuľa APC 20x11E – Závislosť otáčok na čase behu motora.....	56
Obr. č. 9-8: Vrtuľa APC 20x11E - Závislosť napätia na čase behu motora.....	56
Obr. č. 9-9: Vrtuľa APC 20x11E – Závislosť ťahu od otáčok	57
Obr. č. 9-10: Vrtuľa APC 20x11E - Závislosť ťahu na čase behu motora.....	57
Obr. č. 9-11: Vrtuľa APC 20x11E – Závislosť príkonu od otáčok	58
Obr. č. 9-12: Vrtuľa APC 20x11E - Závislosť príkonu na čase.....	58
Obr. č. 9-13: Vrtuľa APC 22x10E – Závislosť otáčok na čase behu motora.....	59
Obr. č. 9-14: Vrtuľa APC 22x10E - Závislosť napätia na čase behu motora.....	60
Obr. č. 9-15: Vrtuľa APC 22x10E - Závislosť ťahu na čase behu motora.....	60
Obr. č. 9-16: Vrtuľa APC 22x10E - Závislosť príkonu na otáčkach	61
Obr. č. 9-17: Vrtuľa APC 22x10E - Závislosť príkonu na čase.....	61
Obr. č. 9-18: Vrtuľa APC 22x10E – Závislosť otáčok na čase behu motora pri využití batérie/zdroju a so zapojeným limiterom resp. bez zapojeného limiteru	62

Obr. č. 9-19: Vrtuľa APC 22x10E – Závislosť napätia na čase behu motora pri využití batérie/zdroju a so zapojeným limiterom resp. bez zapojeného limiteru	62
Obr. č. 9-20: Vrtuľa APC 22x10E – Závislosť ťahu na čase behu motora pri využití batérie/zdroju a so zapojeným limiterom resp. bez zapojeného limiteru	63
Obr. č. 9-21: Vrtuľa APC 22x10E – Závislosť príkonu na čase behu motora pri využití batérie/zdroju a so zapojeným limiterom resp. bez zapojeného limiteru	63
Obr. č. 9-22: Ukážka aplikácie využitej pri meraniach v aerodynamickom tuneli	64
Obr. č. 9-23: Závislosť otáčok na rýchlosti	65
Obr. č. 9-24: Závislosť ťahu na rýchlosti	66
Obr. č. 9-25: Závislosť príkonu od rýchlosti	66
Obr. č. 9-26: Závislosť súčiniteľa ťahu na rýchlosti.....	67
Obr. č. 9-27: Závislosť súčiniteľa výkonu na rýchlosti	67

ZOZNAM TABULIEK

Tab. č. 1: Základné vypočítané parametre lietadla.....	16
Tab. č. 2: Porovnanie základných technických parametrov uvažovaných batérií	27
Tab. č. 3: Porovnanie základných technických parametrov uvažovaných motorov	32
Tab. č. 4: Porovnanie základných parametrov uvažovaných regulátorov.....	34
Tab. č. 5: Vypočítané uhly nastavenia pre vrtule rôznych rozmerov	37
Tab. č. 6: Porovnanie parametrov vybraných vrtulí.....	47
Tab. č. 7: Súčiastky meraného obvodu	51
Tab. č. 8: Parametre aerodynamického tunelu	64

ZOZNAM ELEKTRONICKÝCH PRÍLOH

Príloha A: Výpočty	A
Príloha B: APC 20x8E_merania	B
Príloha C: APC 20x8E_grafy	C
Príloha D: APC 20x11E_merania	D
Príloha E: APC 20x11E_grafy	E
Príloha F: APC 22x10E_merania	F
Príloha G: APC 22x10E_grafy	G
Príloha H: Aerodynamický tunel_meranie + grafy	H